

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**CARLOS FERNANDO QUINTERO QUINTERO**

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES DE  
CONSISTÊNCIA ELEVADA – FORMULAÇÃO E  
COMPORTAMENTO MECÂNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. LETO MOMM

Florianópolis  
2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da  
Universidade Federal de Santa Catarina

Q7e Quintero, Carlos Fernando Quintero

Estudo de misturas asfálticas com ligantes de consistência elevada [dissertação] : formulação e comportamento mecânico / Carlos Fernando Quintero Quintero ; orientador, Leto Momm. - Florianópolis, SC, 2011.

1 v.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Misturas asfálticas. 3. Módulo elevado. 4. Ligante de consistência elevada. I. Momm, Leto. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDU 624

CARLOS FERNANDO QUINTERO QUINTERO

**ESTUDO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM LIGANTES DE  
CONSISTÊNCIA ELEVADA – FORMULAÇÃO E  
COMPORTAMENTO MECÂNICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. LETO MOMM

Florianópolis  
2011

Estudo de Misturas Asfálticas com Ligantes de Consistência Elevada –  
Formulação e Comportamento Mecânico

Esta dissertação foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, especialidade ENGENHARIA CIVIL, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Dr. Leto MOMM - Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dr. Janaíde Cavalcante Rocha  
Coordenador do Curso do PPGEC – UFSC

Comissão Examinadora:

Dr<sup>a</sup>. Leni Figueiredo Mathias Leite  
CENPES/PETROBRAS

Prof. Dr. Liseane Padilha Thives  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Prof. Dr. Orlando Martini de Oliveira  
Departamento de Engenharia Civil – UFSC

Florianópolis - SC  
2011

*“O senhor é meu pastor, nada me falta”  
Salmos 23,1*

### ***Dedicatória***

*A Deus por guiar-me e dar-me discernimento durante cada etapa da minha vida, a minha esposa Zamira Delgado pela compreensão, apoio e amor incondicional, a meus pais Alonso e Dilia, a meus irmãos Jairo, Efrain, Ruben, Diego, Darwim Juliam e Marcela, a meu tio Jairo e sua esposa Omaira, por toda sua colaboração e apoio durante minha formação, a mis primas Karen e Andrea e a minhas tias Alcira e Laddy pelos conselhos, a Rodolfo e Ema Nubia, a toda minha família e amigos que sempre estão presentes quando preciso deles, muito obrigado.*

## AGRADECIMENTOS

Ao Professor Leto Momm, pela amizade, conselhos, orientação e ensinamentos durante meus estudos de mestrado.

A meus amigos e colegas Leandro, Paulo, Murilo, Jose, Manuel, Mario, Breno, Yader, Márcio, Otto, Keyla, Greice, entre outros.

Aos Professores: Orlando Martini de Oliviera, Antonio Fortunato Marcon, Marciano Macarrini, Liseane Padilha Thives, Amir Mattar Valente, Marcos Noronha, Luiz Gomez, pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados durante meu mestrado.

À Dr. Leni Figueiredo Mathias Leite pela amizade, confiança e colaboração no mestrado, sempre disposta a dar apoio às atividades de pesquisa.

À Professora Liedi Bariani Bernucci, por facilitar a realização dos ensaios no Laboratório de Pavimentação da Escola Politécnica de São Paulo.

Ao Edson de Moura, pela amizade, conselhos e auxílio para a execução dos ensaios Laboratório de pavimentação da escola politécnica de São Paulo.

Ao Edi Assini Jr, pela colaboração e auxílio nas atividades complementares ao Laboratório.

Aos colegas e amigos Kendy, Erasmo, Rosangela, Kamila, entre outros do Laboratório Pavimentação da Escola Politécnica de São Paulo que durante minha permanência em suas instalações brindaram sempre sua amizade e apoio.

Agradeço a CENPES/PETROBRAS e refinarias REPAR e REPLAN que fez a doação do ligante asfáltico utilizado para execução da pesquisa.

Agradeço ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq), pela bolsa de estudos para a realização dos estudos de mestrado, Bolsista CNPq – IEL Nacional - Brasil.

À família Delgado Mendez, pelo seu apoio durante meus estudos de mestrado.

Agradeço a todos meus familiares, amigos e pessoas que de uma ou outra forma colaboraram no desenvolvimento desta pesquisa.



## SUMÁRIO

|  |            |
|--|------------|
| <b>RESUMO</b>  | <b>ix</b>  |
| <b>ABSTRACT</b>  | <b>x</b>   |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b>  | <b>xi</b>  |
| <b>LISTA DE TABELAS</b>  | <b>xii</b> |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>   | <b>xix</b> |
| <b>LISTA DE ABREVIACÕES</b>  | <b>xxi</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>  | <b>1</b>   |
| 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS   | 1          |
| 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO  | 3          |
| 1.2.1 <b>Objetivo geral</b>  | 3          |
| 1.2.2 <b>Objetivos específicos</b>   | 3          |
| <b>2 FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS</b>   | <b>9</b>   |
| 2.1 INTRODUÇÃO   | 9          |
| 2.2 NÍVEIS DE FORMULAÇÃO   | 10         |
| 2.3 MISTURAS ASFÁLTICA COM FUNÇÃO SUPERFÍCIE   | 12         |
| 2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS COM FUNÇÃO ESTRUTURAL  | 13         |
| 2.4.1 <b>Misturas asfálticas de módulo elevado</b><br><b>(Enrobés à Module Élevé NF P98-140)</b> | 13         |
| 2.4.2 <b>Misturas Grave-Bitume NF P98-139</b>  | 17         |
| 2.5 EXPERIÊNCIAS NA UTILIZAÇÃO DE LIGANTES DE<br>ELEVADA CONSISTÊNCIA                            | 19         |
| <b>3 COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS</b>  | <b>25</b>  |
| 3.1 INTRODUÇÃO   | 25         |
| 3.2 TIPOS DE ESTRUTURAS DO PAVIMENTO DE<br>CONCRETO ASFÁLTICO                                    | 27         |
| 3.2.1 <b>Pavimento simples</b>   | 27         |
| 3.2.2 <b>Pavimento com camadas asfálticas densas</b>   | 27         |
| 3.2.3 <b>Pavimentos de estrutura mista</b>   | 28         |
| 3.2.4 <b>Pavimento de estrutura inversa</b>  | 28         |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.3   | SOLICITAÇÕES DINÂMICAS SOBRE O PAVIMENTO.....                    | 29 |
| 3.3.1 | <b>Solicitações em camadas de concreto asfáltico .....</b>       | 29 |
| 3.3.2 | <b>Análise da carga em sistema móvel.....</b>                    | 33 |
| 3.4   | VISCOELASTICIDADE DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS                       | 37 |
| 3.4.1 | <b>Domínio temporal.....</b>                                     | 38 |
| 3.4.2 | <b>Módulo complexo - Domínio frequencial .....</b>               | 40 |
| 3.5   | REPRESENTAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO .....                           | 46 |
| 3.6   | FADIGA DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS .....                            | 52 |
| 3.6.1 | <b>Mecanismo de fadiga.....</b>                                  | 55 |
| 3.7   | MODELOS REOLÓGICOS DE.....                                       | 57 |
|       | COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO .....                                | 57 |
| 3.7.1 | <b>Modelo de Maxwell e Kelvin Voigt.....</b>                     | 57 |
| 3.7.2 | <b>Modelo de Huet .....</b>                                      | 58 |
| 3.7.3 | <b>Modelo de Huet-Sayegh.....</b>                                | 59 |
| 3.8   | FATORES QUE INFLUENCIAM NO<br>COMPORTAMENTO DAS MISTURAS .....   | 62 |
| 3.8.1 | <b>Influência do tipo de ligante .....</b>                       | 62 |
| 3.8.2 | <b>Influência do tipo de agregados e granulometria .....</b>     | 66 |
| 3.8.3 | <b>Influência dos finos.....</b>                                 | 67 |
| 3.8.4 | <b>Influência das solicitações aplicadas.....</b>                | 67 |
| 3.8.5 | <b>Influência das condições climáticas .....</b>                 | 70 |
| 3.9   | DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO .....                               | 75 |
| 3.9.1 | <b>Deformação calculada na base da estrutura modelizada.....</b> | 77 |
| 3.9.2 | <b>Deformações admissíveis .....</b>                             | 79 |
| 4     | <b>MATERIAIS E METODOLOGIA.....</b>                              | 84 |
| 4.1   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>  | 84 |
| 4.2   | <b>MATERIAIS .....</b>   | 85 |
| 4.2.1 | <b>Materiais granulares.....</b>                                 | 85 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.2.2 | <b>Material betuminoso e adesividade ao granular</b> .....  | 85  |
| 4.3   | CURVAS GRANULOMETRICAS .....  | 87  |
| 4.4   | RELAÇÕES VOLUMÉTRICAS .....   | 89  |
| 4.5   | TEORES DE LIGANTES DO ESTUDO .....  | 92  |
| 4.6   | ENSAIOS LABORATORIAIS .....   | 95  |
| 4.6.1 | <b>Compactação por cisalhamento giratório (NF P 98-252)</b> .....                                   | 95  |
| 4.6.2 | <b>Sensibilidade a água no ensaio Duriez (NF P 98-251-1)</b> .....                                  | 99  |
| 4.6.3 | <b>Ensaio de deformação permanente NF P 98-253-1</b> .....  | 103 |
| 4.6.4 | <b>Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de módulo complexo e resistência a fadiga</b> ..... | 106 |
| 4.6.5 | <b>Módulo complexo</b> .....  | 113 |
| 4.6.6 | <b>Ensaio de fadiga</b> .....   | 118 |
| 5     | <b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....   | 119 |
| 5.1   | ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO .....  | 119 |
|       | PORCISALHAMENTO GIRATÓRIO (PCG) .....   | 119 |
| 5.1.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....  | 119 |
| 5.1.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....  | 122 |
| 5.2   | ENSAIO DURIEZ.....  | 125 |
| 5.2.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....  | 125 |
| 5.2.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....  | 128 |
| 5.3   | ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....  | 130 |
| 5.3.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....  | 130 |
| 5.3.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....  | 135 |
| 5.4   | ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO.....  | 139 |
| 5.4.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....  | 140 |
| 5.4.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....  | 146 |
| 5.5   | ENSAIO DE FADIGA.....   | 151 |
| 5.5.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....  | 151 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 5.5.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....   | 157 |
| 6     | <b>EXPLORAÇÃO DE RESULTADOS</b> .....      | 165 |
| 6.1   | ENSAIO DE COMPACTAÇÃO POR.....             | 165 |
|       | CISALHAMENTO GIRATÓRIO (PCG) .....         | 165 |
| 6.1.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....     | 165 |
| 6.1.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....   | 166 |
| 6.1.3 | <b>Comparação das misturas</b> .....       | 167 |
| 6.2   | SENSIBILIDADE À ÁGUA NO ENSAIO DURIEZ..... | 168 |
| 6.2.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....     | 168 |
| 6.2.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....   | 169 |
| 6.2.3 | <b>Comparação das misturas</b> .....       | 169 |
| 6.3   | ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE .....      | 170 |
| 6.3.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....     | 170 |
| 6.3.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....   | 172 |
| 6.3.3 | <b>Comparação das misturas</b> .....       | 174 |
| 6.4   | ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO .....            | 175 |
| 6.4.1 | <b>Misturas de módulo elevado</b> .....    | 176 |
| 6.4.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....   | 176 |
| 6.4.3 | <b>Comparação entre as misturas</b> .....  | 176 |
| 6.5   | ENSAIO DE FADIGA.....                      | 180 |
| 6.5.1 | <b>Mistura de módulo elevado</b> .....     | 180 |
| 6.5.2 | <b>Mistura <i>grave-bitume</i></b> .....   | 181 |
| 6.5.3 | <b>Comparação entre as misturas</b> .....  | 181 |
| 6.6   | MODELO REOLÓGICO DE HUET-SAYEGH .....      | 183 |
| 6.7   | DIMENSIONAMENTO .....                      | 186 |
| 7     | <b>CONCLUSÕES</b> .....                    | 195 |
|       | REFERÊNCIAS.....                           | 199 |

## RESUMO

A pesquisa abrange o estudo de misturas asfálticas produzidas com ligantes de consistência elevada em relação à formulação e às propriedades mecânicas de rigidez (módulo complexo) e deformação admissível (resistência à fadiga). Duas misturas asfálticas para camadas estruturais do pavimento são formuladas, sendo uma referente a uma mistura grave-bitume (GB-3) dosada com Cimento Asfáltico de Petróleo CAP 30/45 fornecido pela refinaria da REPLAN e outra mistura asfáltica relativa a uma mistura de módulo elevado (EME-2) dosada com cimento asfáltico de petróleo com penetração  $10 \times 10^{-1}$  mm. O material granular utilizado é proveniente de uma suíte intrusiva do município de Palhoça-SC. Na composição da mistura asfáltica deseja-se que tanto o módulo complexo quanto a resistência à fadiga das misturas asfálticas, em conjunto, apresentem valores elevados, garantindo um pavimento de alta resistência para rodovias de elevado volume de tráfego pesado e canalizado. Na formulação das misturas asfálticas, destaca-se o desempenho para cada etapa de ensaios desde o nível de 1 até o nível 4, realizada através da metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas. Inicialmente verifica-se a habilidade da mistura asfáltica à compacidade no ensaio de compactação por cisalhamento giratório, a sensibilidade à água no ensaio de Duriez, a resistência à deformação permanente, o módulo complexo e a resistência à fadiga. O dimensionamento do pavimento é realizado considerando o comportamento viscoelástico das camadas betuminosas de maneira que a deformação calculada na base das camadas seja menor à deformação admissível do material. O comportamento viscoelástico verifica-se nos ensaios de módulo complexo, representado através do modelo reológico de Huet-Sayegh e a deformação admissível é obtida no ensaio de fadiga na flexão alternada em modo contínuo. A verificação dos efeitos na estrutura do pavimento faz-se pela aplicação do programa *ViscoRoute* que incorpora o modelo de Huet-Sayegh para as camadas viscoelásticas, considerando o efeito da temperatura e da carga em movimento.

**Palavras-chave:** misturas de módulo elevado, misturas *grave-bitume*, módulo complexo, fadiga.

## ABSTRACT

This research comprises the study of asphalt mixtures produced with binders of high consistency according to the formulation and to the mechanical properties of stiffness (complex module) and admissible strain (fatigue resistance). Two asphalt mixtures for structural layers of pavement are formulated, one being in regard to a mixture *grave-bitume* class 3 (GB3) dosed with asphalt binder 30/45, supplied by the refinery known as REPLAN and another high modulus asphalt mixtures of class 2 (EME-2) dosed with asphalt binder graded as  $10 \times 10^{-1}$  mm. The used granular material from a intrusive suite from Palhoça-SC. It is intended that mixtures present elevate values concerning to the complex module and fatigue, aiming to provide good resistance to the pavement structures, especially in situations of heavy volume of heavy and canalized traffic. In the formulation of the asphalt mixtures stands out the performance for each stage of testing, since level 1 until level 4, achieved through the French methodology to verify the behavior of the asphalt mixes at each step of test. Initially, it is verified the measurement of the compacting capability asphalt mixture, by the gyratory shear compacting press, also the sensitivity to the water in the Duriez test, the rutting test, the complex module and fatigue resistance. The pavement design is realized considering the viscoelastic behavior of the asphalt layers in a form that the calculated strains are smaller to the admissible strains of the material. The viscoelastic behavior is verified in the complex module tests, represented through the of Huet-Sayegh model and the admissible strain is obtained in the fatigue test, carried in the alternated flexion in continuous mode. The ViscoRoute software was used to simulate the mechanical behavior of the pavement structures that includes the Huet-Sayegh model for the viscoelastic layers, including the effect of the temperature and of the dynamic loading.

**Keywords:** high modulus asphalt mixture, *grave-bitume* mixture, complex modulus, fatigue.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Resumo da matriz de ensaios.....   | 6  |
| Figura 2. Resumo dos níveis de formulação (LCPC, 2007).....  | 12 |
| Figura 3. Configurações da pista experimental testada na França 1992 a 1994 (Corte et al., 1994). ....   | 20 |
| Figura 4. Corpo do pavimento numa estrutura multicamada .....  | 26 |
| Figura 5. Pavimento simples (SETRA-LCPC, 1997).....  | 27 |
| Figura 6. Pavimento com camada betuminosa densa. (SETRA-LCPC, 1997). ....  | 28 |
| Figura 7. Pavimento estrutura mista (SETRA-LCPC, 1997). ....   | 28 |
| Figura 8. Pavimento de estrutura inversa (SETRA-LCPC, 1997).....   | 29 |
| Figura 9. Solicitações induzidas pelo tráfego (Di Benedetto, 1998). ....   | 29 |
| Figura 10. Deformação das camadas com a passagem de uma roda simples (PERRET, 2003). ....  | 30 |
| Figura 11. Sinais de deformação na fibra inferior da camada de base para temperatura de 30°C (PERRET, 2003).....   | 31 |
| Figura 12. Sinais de deformação na fibra inferior da camada de rolamento para temperatura de 30C (PERRET, 2003). ....  | 31 |
| Figura 13. Superposição do sinal de deformação (roda simples 5°C, 11,5 t e 8 bar), com a curva sinusoidal de frequência correspondente (PERRET, 2003). ....  | 32 |
| Figura 14. Análise da carga em sistema móvel (NGUYEN, 2002).....   | 33 |
| Figura 15. Comparação do sinal longitudinal a $\epsilon_{xx}$ a uma profundidade de 0.085 m, valores experimentais em pista de teste (L11 a L17) e modelados como o programa <i>ViscoRoute</i> (DUHAMEL, 2005). .... | 36 |
| Figura 16. Comparação do sinal transversal $\epsilon_{yy}$ a uma profundidade de 0.085 m, valores experimentais em pista de teste (T0 a T13) e modelados como o programa <i>ViscoRoute</i> (DUHAMEL, 2005). ....     | 36 |
| Figura 17. Fluência a tensão constante (OLARD, 2003). ....   | 38 |
| Figura 18. Relaxação a deformação constante (OLARD, 2003). ....  | 39 |
| Figura 19. Representação do módulo complexo no plano complexo. ....  | 44 |
| Figura 20. Módulo complexo mediante flexão alternada no domínio, funções defasadas.....  | 45 |
| Figura 21. Representação do módulo em curvas isotérmicas (MOMM, 1998). ....  | 46 |
| Figura 22. Translação Gráfica das Curvas Isotérmicas (MOMM, 1998). ....  | 48 |
| Figura 23. Curvas Equivalência - Frequência – Temperatura .....  | 49 |
| Figura 24. Representação do módulo complexo em curvas isócronas (MOMM, 1998). ....   | 50 |
| Figura 25. Módulo complexo no plano COLE-COLE (MOMM, 1998). ....   | 51 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 26. Módulo complexo representado no espaço Black.....  | 51 |
| Figura 27. (a) modelo de comportamento dos pavimentos asfálticos<br>contexto geral (b) simulação em laboratório (DOMEK, 2009). ..                                       | 52 |
| Figura 28. Sinais de solicitação e resposta nos dos modos do ensaio, (a)<br>tensão controlada (b) deformação controlada (BAAJ, 2002). ....                              | 53 |
| Figura 29. Ensaio de fadiga a deformação controlada em modo contínuo<br>(MOMM, 1998).....   | 55 |
| Figura 30. Definição do número de ciclos de ruptura. ....   | 55 |
| Figura 31. Distinção entre as três fases no ensaio de fadiga<br>(a) deslocamento controlado (b) tensão controlada. ....   | 56 |
| Figura 32. Modelo de Maxwell e Kelvin Voigt no domínio temporal<br>(MILLARD, 2005). ....  | 57 |
| Figura 33. Representação analógica do modelo de (HUET, 1963). ....  | 58 |
| Figura 34. Modelo reológico de Huet-Sayegh.....   | 59 |
| Figura 35. Determinação do módulo infinito no espaço Black. ....  | 61 |
| Figura 36. Modelo de Huet-Sayegh no plano Cole-Cole. ....   | 61 |
| Figura 37. Representação no espaço Black (OLARD, 2003). ....  | 63 |
| Figura 38. Equivalência frequência – temperatura (OLARD, 2003).....   | 63 |
| Figura 39. Superposição da curva equivalencia frecuencia temperatura<br>(OLARD, 2003). ....   | 64 |
| Figura 40. Representação no plano Cole-Cole (OLARD, 2003).....  | 65 |
| Figura 41. Modulo complexo das misturas, espaço Black,<br>(CANSTANEDA, 2003). ....  | 65 |
| Figura 42. Modulo complexo, no plano Cole-Cole (CASTANEDA, 2003).<br>.....  | 66 |
| Figura 43. Impressão do pneu em função do tipo de eixo e pressão<br>(PERRET, 2003). ....  | 67 |
| Figura 44. Repartição das pressões de contacto do pneu para diferentes<br>condições de carga (DE BEER, 1997; PERRET, 2007).....   | 68 |
| Figura 45. Sinal de deformação na fibra inferior da camada de base<br>(EME) a 15°C e estrutura de 17cm para roda simples no<br>sentido longitudinal (PERRET, 2003)..... | 69 |
| Figura 46. Sinal de deformação na fibra inferior da camada de base<br>(EME) a 15°C e estrutura de 17cm para roda dupla no sentido<br>longitudinal (PERRET, 2003). ....  | 69 |
| Figura 47. Solicitações induzidas pela temperatura (OLARD, 2003). ....  | 70 |
| Figura 48. Curvas de fadiga para diferentes temperaturas a 40Hz,<br>mistura GB e com 4,6% de ligante 50/70 (DOMEK, 2005). ....  | 71 |
| Figura 49. Modulo complexo dentro do plano complexo mistura GB3<br>(DOMEK, 2005).....   | 72 |
| Figura 50. Sinal de deformação na camada de base (EME2), diferentes<br>temperaturas, estrutura espessura 10cm (PERRET, 2003). ....                                      | 73 |



|  |     |
|--|-----|
| Figura 51. Evolução do módulo de rigidez após de ciclos de imersão e secagem (CASTAÑEDA, 2005). .....  | 74  |
| Figura 52. Deformações calculadas para $10^6$ ciclos, para as misturas asfálticas CTB e CTBPC (BARRA, 2009). .....   | 74  |
| Figura 53. Dimensionamento racional do pavimento (MOMM, 1998).....   | 76  |
| Figura 54. Modelização da estrutura do pavimento considerando as camadas viscoelásticas e modelo de Huet-Sayegh (DUHAMEL et al., 2005). .....  | 78  |
| Figura 55. Adesividade (a) 0% dope, (b) 0.5% dope, (c) 1% dope. ....   | 86  |
| Figura 56. Curvas de viscosidade.....  | 87  |
| Figura 57. Curvas granulométricas. ....  | 89  |
| Figura 58. Ensaio de compactação por cisalhamento giratório. ....  | 95  |
| Figura 59. Modelo e cálculo do valor de K1 (LCP, 2007). ....   | 97  |
| Figura 60. Ensaio de compactação por cisalhamento giratório (a) PCG3 (b) preparação da mistura (c) e (d) colocação da mistura no molde (e) corpo-de-prova na prensa (f) desmoldagem..... | 98  |
| Figura 61. Verificação e calibração da velocidade de avanço da prensa... ..  | 100 |
| Figura 62. Sequência da compactação no ensaio duriez (a) usinagem (b) tempo de repouso em estufa duas horas (c) compactação (d) detalhe da compactação.....                              | 101 |
| Figura 63. Condicionamento e ruptura dos corpos de prova Duriez (a) aplicação de vácuo (b) condicionamento com imersão e sem imersão. ....   | 102 |
| Figura 64. Ruptura dos corpos de prova Duriez (a) ruptura do corpo de prova (b) corpos de prova após a ruptura. ....   | 102 |
| Figura 65. Processo mistura (a) aquecimento dos granulares materiais fino à esquerda e material grosso à direita (b) mistura.....  | 103 |
| Figura 66. Preparação das placas (a) repouso após da usinagem (b) compactação (c) placas para os teores de 4.3% até 4.9 (d) pesagem hidrostática das placas. ....                        | 104 |
| Figura 67. Ensaio de deformação permanente (a) placa condicionada para o ensaio (b) medida da profundidade de deformação. ....   | 105 |
| Figura 68. Material para uma placa de 40cmx60cmx12cm. ....   | 107 |
| Figura 69. (a) mistura (b) mistura em repouso por um período de duas horas (b) mesa compactador (d) placas após a compactação. ..  | 108 |
| Figura 70. (a) corte transversal (b) corte no borde e centro, comprimento 250mm±1mm (c) corte longitudinal em laminas de espessura 25mm±1mm (d) placas para cada corpo-de-prova. ....    | 109 |
| Figura 71. Conjunto de lâminas cortadas. ....  | 110 |
| Figura 72. Corte dos corpos de prova trapezoidais. ....  | 110 |
| Figura 73. Conjunto de 20 corpos-de-prova por placa da mistura de módulo elevado. ....   | 111 |
| Figura 74. Dimensões do corpo-de-prova. ....   | 112 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 75. (a) esquerda corpo-de-prova tipo da mistura <i>grave-bitume</i> (b) direita corpo-de-prova da mistura de módulo elevado. ....   | 112 |
| Figura 76. Máquina de módulo complexo e resistência a fadiga. ....   | 113 |
| Figura 77. (a) Controle de temperatura (b) controle de frequência. ....  | 114 |
| Figura 78. Colagem dos corpos-de-prova com adesivo Araldite. ....  | 115 |
| Figura 79. (a) corpo-de-prova parafusado no topo e na base (a) célula de carga e sensor de Hall de deslocamento (c) excêntrico da máquina. ....  | 115 |
| Figura 80. Corpos-de-prova colocados na máquina de módulo e fadiga. ....   | 116 |
| Figura 81. Mistura de módulo elevado, corpos-de-prova moldados. ....   | 120 |
| Figura 82. Mistura de módulo elevado, habilidade a compacidade. ....   | 121 |
| Figura 83. Mistura <i>grave-bitume</i> , corpos de prova moldados. ....  | 122 |
| Figura 84. Mistura <i>grave-bitume</i> , habilidade a compacidade. ....  | 124 |
| Figura 85. Mistura de módulo elevado, corpos de prova Duriez após a ruptura. ....  | 126 |
| Figura 86. Mistura de módulo elevado, tensão de ruptura com e sem condicionamento. ....  | 127 |
| Figura 87. Mistura <i>grave-bitume</i> , corpos-de-prova Duriez da após da ruptura. ....   | 128 |
| Figura 88. Mistura <i>grave-bitume</i> , tensão de ruptura. ....   | 129 |
| Figura 89. Mistura de módulo elevado, placas após do ensaio de deformação permanente. ....   | 131 |
| Figura 90. Cortes das placas (a) 5,1% ligante - Placa 01 (b) 5,1% ligante-laca 02 (c) 5,3% ligante - Placa 03 (d) 5,3% ligante - Placa 04 (e) 5,5% ligante - Placa 05 (f) 5,5% ligante - Placa 06. ....  | 132 |
| Figura 91. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.1%. ....   | 133 |
| Figura 92. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.3%. ....   | 133 |
| Figura 93. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.5%. ....   | 134 |
| Figura 94. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.7%. ....   | 134 |
| Figura 95. Mistura <i>grave-bitume</i> , placas após do ensaio de deformação permanente. ....  | 135 |
| Figura 96. Cortes das placas (a) 4,3% ligante - Placa 01 (b) 4,3% ligante - Placa 02 (c) 4,5% ligante - Placa 03 (d) 4,5% ligante - Placa 04 (e) 4,7% ligante - Placa 05 (f) 4,7% ligante - Placa 06 (g) 4,9% ligante - Placa 07 (h) 4,9% ligante - Placa 08. .... | 136 |
| Figura 97. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura <i>grave-bitume</i> teor 4.3%. ....   | 137 |
| Figura 98. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, mistura <i>grave-bitume</i> teor 4.5%. ....   | 137 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 99. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento,<br>Mistura <i>grave-bitume</i> teor 4,7%.....                         | 138 |
| Figura 100. Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento,<br>Mistura <i>grave-bitume</i> teor 4,9%.....                        | 138 |
| Figura 101. Mistura de módulo elevado, representação plano Cole-Cole.  | 142 |
| Figura 102. Mistura de módulo elevado, representação curvas isotermas.   | 143 |
| Figura 103. Mistura de módulo elevado, representação curvas isócronas.   | 143 |
| Figura 104. Mistura de módulo elevado representação no espaço Black..  | 144 |
| Figura 105. Mistura de módulo elevado curva equivalência freqüência<br>temperatura para 15°C.....                                    | 145 |
| Figura 106. Mistura <i>grave-bitume</i> , representação no plano Cole-Cole.....  | 147 |
| Figura 107. Mistura <i>grave-bitume</i> representação em curvas isotermas. ...   | 147 |
| Figura 108. Mistura <i>grave-bitume</i> representação em curvas isócronas.....   | 148 |
| Figura 109. Mistura <i>grave-bitume</i> representação no espaço Black.....   | 149 |
| Figura 110. Mistura <i>grave-bitume</i> curva equivalência freqüência<br>temperatura para 15°C.....                                  | 150 |
| Figura 111. Curva de fadiga mistura módulo elevado a 10°C e 25Hz. ....   | 153 |
| Figura 112. Curva de fadiga mistura módulo elevado a 30°C e 25Hz. ....   | 156 |
| Figura 113. Curva de fadiga mistura <i>grave-bitume</i> a 10°C e 25Hz. ....  | 159 |
| Figura 114. Ruptura geral dos de corpos-de-prova aceitos. ....   | 160 |
| Figura 115. Superfície de ruptura no ensaio de fadiga (a) pelo contorno<br>dos granulares (b) ruptura com quebra dos granulares..... | 160 |
| Figura 116. Tendência do ângulo de fase e força no ensaio de fadiga. ....  | 161 |
| Figura 117. Evolução do ângulo de fase no ensaio de fadiga para<br>mistura <i>grave-bitume</i> . ....                                | 162 |
| Figura 118. Evolução do ângulo de fase no ensaio de fadiga para<br>mistura de módulo elevado. ....                                   | 163 |
| Figura 119. Influência do teor de ligante na compacidade no nível<br>dos 80 giros. ....  | 166 |
| Figura 120. Influência do teor de ligante na compacidade no nível<br>dos 100 giros. ....   | 167 |
| Figura 121. Comparação das misturas asfálticas.....  | 168 |
| Figura 122. Comparação da resistência a compressão simples . ....  | 170 |
| Figura 123. Mistura de módulo elevado, variação do afundamento em<br>função do teor de ligante. ....                                 | 171 |
| Figura 124. Evolução da deformação permanente por placa com o<br>incremento do teor de ligante. ....                                 | 171 |
| Figura 125. Afundamento nos 30000 ciclos, com o incremento do<br>teor de ligante.....  | 172 |
| Figura 126. Comparação do ensaio de deformação permanente,<br>mistura <i>grave-bitume</i> . ....                                     | 173 |
| Figura 127. Evolução da deformação permanente com o incremento<br>do teor de ligante.....  | 174 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 128. Afundamento no nível dos 10000 ciclos e 30000, com o incremento do teor de ligante. ....                               | 174 |
| Figura 129. Comparação do módulo complexo das misturas asfálticas em no plano Cole-Cole. ....                                      | 177 |
| Figura 130. Comparação da susceptibilidade térmica das misturas em representação de curvas isotermas. ....                         | 178 |
| Figura 131. Comparação da mistura de módulo elevado e mistura <i>grave-bitume</i> , para uma temperatura equivalente de 15°C. .... | 179 |
| Figura 132. Comparação entre as curvas de fadiga. ....   | 182 |
| Figura 133. Deformação correspondente para um milhão de ciclos no ensaio de fadiga à temperatura do ensaio. ....                   | 183 |
| Figura 134. Variação de tau com a temperatura. ....  | 184 |
| Figura 135. Representação da mistura de módulo elevado no modelo de Huet-Sayegh. ....  | 185 |
| Figura 136. Representação da mistura <i>grave-bitume</i> no modelo de Huet-Sayegh. ....  | 185 |
| Figura 137. Estrutura do pavimento tipo analisado. ....  | 189 |
| Figura 138. Estruturas do pavimento para a temperatura equivalente de 15°C e 10Hz. ....  | 190 |
| Figura 139. Estruturas do pavimento para a temperatura de 30°C e 10Hz. ....  | 191 |
| Figura 140. Sinal de deformação alternativa I, temperatura equivalente de 15°C e velocidade de 72km/hr. ....                       | 192 |
| Figura 141. Sinal de deformação alternativa II, temperatura equivalente de 15°C e velocidade de 72km/hr. ....                      | 192 |
| Figura 142. Sinal de deformação alternativa III, temperatura equivalente de 15°C e velocidade de 72km/hr. ....                     | 193 |
| Figura 143. Sinal de deformação alternativa III, temperatura equivalente de 30°C e velocidade de 72km/hr. ....                     | 193 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1. Teor mínimo de ligante para as misturas de módulo elevado .....   | 14 |
| Tabela 2. Propriedade mecânica mínimas para misturas de módulo elevado (SETRA, 1997). .....   | 15 |
| Tabela 3. Indicativo de variação do módulo a 10 Hz (MPa), para as diferentes temperaturas (SETRA-LCPC, 1997). .....                       | 15 |
| Tabela 4. Resumo dos parâmetros da mistura de módulo elevado .....  | 16 |
| Tabela 5. Teor de ligante mínimo para as misturas <i>grave-bitume</i> .....   | 17 |
| Tabela 6. Granulométrica recomendada para misturas <i>grave-betume</i> e módulo elevado, diâmetro máximo 14mm ou 20mm (LCPC, 2007). ..... | 17 |
| Tabela 7. Propriedade mecânica mínimas para misturas <i>grave-bitume</i> .....  | 18 |
| Tabela 8. Indicativo de variação do módulo complexo a 10 Hz (MPa), para as diferentes temperaturas (SETRA-LCPC, 1997). .....              | 18 |
| Tabela 9. Resumo dos parâmetros mistura <i>grave-bitume</i> (LCPC, 2007). ...   | 19 |
| Tabela 10. Configurações das pista experimental testada na França 1992-1994 (Corte et al., 1994). .....                                   | 20 |
| Tabela 11. Produção de misturas de módulo elevado de o ano 1989 a 1995 (SETRA, 1997). .....   | 21 |
| Tabela 12. Propriedades das misturas de módulo elevado estudadas por (PERRET et al., 2004). .....   | 22 |
| Tabela 13. Granulometrias de misturas de módulo elevado estudadas no Brasil (RODHE, 2007). .....  | 23 |
| Tabela 14. Funções descritas por Cristian Huet (1963). .....  | 42 |
| Tabela 15. Características dos ligantes utilizados por (OLARD, 2003). .....   | 62 |
| Tabela 16. Temperaturas de superposição das misturas a mistura de referência (OLARD, 2003). .....   | 64 |
| Tabela 17. Características em fadiga e modo contínuo para misturas GB3 e 4,6% de ligante 50/70 (DOMECH, 2005). .....                      | 72 |
| Tabela 18. Resultados de fadiga para diferentes condições de ensaio (De La Roche 1997). .....   | 73 |
| Tabela 19. Classes de capacidade de suporte da superfície (AR) .....  | 81 |
| Tabela 20. Classes de capacidade da plataforma de fundação (PF) .....   | 81 |
| Tabela 21. Definição da classe de tráfego (SETRA-LCPC, 1997). .....   | 81 |
| Tabela 22. Comparação de estruturas GB – EME (BROSSEAUD, 2006) .  | 82 |
| Tabela 23. Características dos agregados. ....  | 85 |
| Tabela 24. Características dos ligantes utilizados. ....  | 86 |
| Tabela 25. Temperatura de mistura e compactação. ....   | 87 |
| Tabela 26. Espessuras de utilização das misturas de módulo elevado e <i>grave-bitume</i> . ....   | 88 |
| Tabela 27. Distribuição granulométrica da misturas do estudo. ....  | 89 |
| Tabela 28. Critério para a seleção dos teores de ligante. ....  | 93 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 29. Teores de ligante mínimos e teores de ligante adotados. ....  | 94  |
| Tabela 30. Massa volumétrica da mistura <i>grave-bitume</i> . ....   | 94  |
| Tabela 31. Massa volumétrica da mistura de módulo elevado. ....  | 94  |
| Tabela 32. Condições de ensaio Duriez em função do diâmetro D. ....  | 99  |
| Tabela 33. Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de módulo<br>complexo e resistência à fadiga. ....  | 109 |
| Tabela 34. Volume de vazios no nível dos 80 giros. ....  | 120 |
| Tabela 35. Volume de vazios no nível dos 100 giros. ....   | 123 |
| Tabela 36. Mistura de módulo elevado, tensão de ruptura. ....  | 126 |
| Tabela 37. Mistura <i>grave-bitume</i> , tensão de ruptura. ....   | 129 |
| Tabela 38. Volume de vazios das placas para ensaio de deformação<br>permanente. ....   | 130 |
| Tabela 39. Mistura <i>grave-bitume</i> , ensaio de deformação permanente. ....   | 135 |
| Tabela 40. Propriedades volumétricas das placas para módulo e fadiga. ....   | 140 |
| Tabela 41. Desvio padrão do Vv e coeficiente de variação K <sub>ε</sub> dos corpos<br>de-prova selecionados para ensaio de módulo e fadiga. .... | 140 |
| Tabela 42. Resultados do ensaio de módulo complexo, mistura EME. ....  | 141 |
| Tabela 43. Resultados do ensaio de módulo complexo, mistura GB. ....   | 146 |
| Tabela 44. Ensaio de fadiga 10°C e 25Hz mistura de módulo elevado. ....  | 152 |
| Tabela 45. Valores característicos das curvas de fadiga 10°C e 25Hz. ....  | 154 |
| Tabela 46. Ensaio de fadiga 30°C e 25Hz mistura de módulo elevado. ....  | 155 |
| Tabela 47. Valores característicos das curvas de fadiga a 30°C e 25Hz. ....  | 157 |
| Tabela 48. Ensaio de fadiga 10°C e 25Hz mistura <i>grave-bitume</i> . ....   | 158 |
| Tabela 49. Valores característicos das curvas de fadiga a 10°C e 25Hz. ....  | 160 |
| Tabela 50. Parâmetros do modelo de Huet-Sayegh. ....   | 183 |
| Tabela 51. Coeficientes de risco adotados. ....  | 187 |
| Tabela 52. Deformações admissíveis dos materiais betuminosos<br>temperatura de referência 15°C. ....   | 187 |
| Tabela 53. Deformação admissível calculada a partir da curva de<br>fadiga a 30°C. ....   | 188 |
| Tabela 54. Dimensionamento para um a temperatura de referência<br>15°C e 10Hz. ....  | 190 |
| Tabela 55. Dimensionamento para estrutura com mistura de módulo<br>elevado a temperatura 30°C e 10Hz. ....                                       | 191 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                    |  |
|--------------------|--|
| $D_{\text{máx}}$   | diâmetro máximo  |
| $n$                | expoente da curva granulométrica                                   |
| $\%p$              | percentagem passante   |
| $K$                | módulo de riqueza  |
| $\varepsilon_6$    | deformação para um milhão de solicitações.                         |
| $s$                | segundos   |
| $MVR$              | massa volumétrica real   |
| $MVA$              | massa volumétrica aparente   |
| $R$                | tensão de ruptura a compressão simples sem condicionamento na água |
| $r$                | tensão de ruptura a compressão simples com condicionamento na água |
| $V_{vi}$           | volume de vazios mínimo  |
| $V_{vs}$           | volume de vazios máximo  |
| $\mu_{\text{def}}$ | microdeformações   |
| $t$                | toneladas  |
| $X_1$              | eixo móvel na direção $x$  |
| $X_2$              | eixo móvel na direção $y$  |
| $X_3$              | eixo móvel na direção $z$  |
| $x_1$              | eixo fixo na direção $x$   |
| $x_2$              | eixo fixo na direção $y$   |
| $x_3$              | eixo fixo na direção $z$   |
| $\rho$             | densidade  |
| $E$                | módulo de elasticidade   |
| $U$                | deslocamento   |
| $\omega$           | pulsação   |
| $t$                | tempo  |
| $v$                | velocidade   |
| $\nabla$           | operador de Laplace  |
| $c_p$              | velocidade das ondas de compressão                                 |
| $c_s$              | velocidade das ondas de cisalhamento                               |
| $\lambda, \mu$     | coeficientes elasticos de Lamé                                     |
| $g$                | gravidade  |
| $\varepsilon$      | deformação   |
| $\sigma$           | tensão   |
| $f$                | frequência   |
| $\varepsilon_o$    | amplitude de deformação  |
| $R$                | módulo de relaxação  |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $\varepsilon^*$         | deformação complexa  |
| $\sigma^*$              | tensão complexa  |
| $\varphi$               | ângulo de defasagem  |
| E1                      | parte real do módulo, associado à energia recuperada                         |
| E2                      | parte imaginária do módulo, associado à energia perdida                      |
| N                       | número de aplicação das solicitações   |
| S                       | solicitação (tensão ou deformação)   |
| b                       | inclinação da curva  |
| a                       | constante  |
| $S^*$                   | solicitação complexa senoidal  |
| $R^*$                   | resposta complexa senoidal   |
| $S_m$                   | amplitude da solicitação   |
| $R_m$                   | amplitudes da resposta   |
| Nf                      | duração de vida  |
| $E_\infty$              | módulo instantâneo do modelo de Huet-Sayegh                                  |
| $E_0$                   | módulo estático para situações de baixas frequências e elevadas temperaturas |
| k, h                    | parâmetros dos elementos parabólicos do modelo Huet-Sayegh                   |
| $\delta$                | função da natureza do betume e curva granulométrica,                         |
| $\tau$                  | tempo de relaxação dos amortecedores   |
| SN                      | desvio padrão dos resíduos do ensaio de fadiga                               |
| Sh                      | dispersão sobre a espessura da camada  |
| u                       | variável associada ao risco  |
| $\delta$                | desvio-padrão da distribuição do $\log(N)$ para $10^6$ ciclos                |
| $\alpha_T$              | fator de translação  |
| °                       | graus  |
| °C                      | graus centígrados  |
| $\sigma_{K\varepsilon}$ | desvio padrão do coeficiente de forma  |
| d                       | abertura da peneira  |
| P                       | deformação permanente  |
| $E^*$                   | módulo complexo  |
| $K_\sigma$              | coeficiente de força   |
| $K_\varepsilon$         | coeficiente de forma   |
| tr                      | translações  |
| V                       | volume   |
| C                       | compacidade  |



## LISTA DE ABREVIACÕES

|                  |  |
|------------------|--|
| BBM              | <i>Béton Bitumineux Mince</i>                                    |
| BBTM             | <i>Béton Bitumineux Très Mince</i>                               |
| BBD <sub>r</sub> | <i>Béton Bitumineux Drainant</i>                                 |
| BBUM             | <i>Béton Bitumineux Ultra Mince</i>                              |
| E M E            | <i>Enrobés à Module Elevé</i>                                    |
| GB               | <i>Grave-Bitume</i>  |
| BBSG             | <i>Béton Bitumineux Semi-Grenu</i>                               |
| BBS              | <i>Béton Bitumineux pour chaussée Souple à faible trafic</i>     |
| GTN              | Granulares Não Tratados  |
| CAP              | Cimento Asfáltico de Petróleo                                    |
| D N E R          | Departamento Nacional De Estradas De Rodagem                     |
| PCG              | Prensa de Cisalhamento Giratório                                 |
| SETRA            | <i>Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes</i>      |
| RV               | Resíduo de vácuo   |
| LCPC             | <i>Laboratoire Central des Ponts et Chaussées</i>                |
| EPUSP            | Escola Politecnica da Universidade de São Paulo                  |
| LPC              | <i>Laboratoire Des Ponts Et Chaussées</i>                        |
| NF               | Norma Francesa   |
| RILEM            | Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux |
| PST              | Parte Superior de Terraplenagem                                  |
| AR               | Superfície do arado de Terraplenagem                             |
| PF               | Plate-Forme  |
| MJA              | Tráfego Médio Diário Anual                                       |
| T                | Tráfego  |
| ABNT             | Associação Brasileira de Normas Técnicas                         |



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os pavimentos em concreto asfáltico, os mais usados no mundo, são aplicados desde locais de climas frios a locais de clima quente, quer em ambientes secos a úmidos, no nível do mar a grandes altitudes, sob solicitação de tráfego leve a pesado, e ainda, em vias de tráfego lento a vias de tráfego rápido.

O concreto asfáltico é caracterizado por ser um material viscoelástico termicamente susceptível, têm seu comportamento mecânico dependente da temperatura, da velocidade de aplicação da carga e do ambiente. Sob temperaturas mais elevadas, os concretos asfálticos são menos rígidos, sob solicitação de elevadas frequências são mais rígidos. Torna-se, pois, um desafio conhecer completamente o comportamento deste material para aplicá-lo de modo a tirar o maior proveito.

Por outro lado, a fadiga deste material também depende destes fatores. Com o aumento da frequência, a deformação na fadiga pode ser diminuída, a resistência à fadiga também é dependente da temperatura. Tendo em conta que os concretos asfálticos oferecem maior risco da ocorrência de deformação permanente (trilhas de rodas) em locais de temperaturas mais elevadas, parece conveniente usar cimentos asfálticos com consistência elevada para mitigar estes riscos da formação das trilhas de rodas nas vias. Estes são defeitos do pavimento que causam enorme redução do conforto ao usuário e aumento dos riscos de acidente. É, pois, um parâmetro essencial de controle de qualidade do pavimento.

Existem diversas metodologias de formulação das misturas de concreto asfáltico (RILEM, 1998); simples receitas, empíricas, por cálculos analíticos, empíricas com alguma tentativa de aplicação racional, por propriedades volumétricas e a metodologia por ensaios fundamentais, que aplica ensaios que simulam em laboratório o comportamento observado no campo (LCPC, 2007).

A metodologia de formulação por ensaios fundamentais vem sendo desenvolvida há anos na França, definindo diferentes tipos de misturas asfálticas, segundo sua funcionalidade, com o propósito de garantir a qualidade de um bom pavimento de maneira que seja durável e que atenda a funcionalidade em parâmetros controlados de conforto e segurança.

Nesta ótica, a concepção das camadas do pavimento pode ser abordada segundo a função que vão desempenhar, isto é, em camadas que tem função de superfície para garantir os parâmetros de segurança e conforto, e em camadas que tem função estrutural para garantir que a estrutura resista íntegra por todo o horizonte de projeto.

Sendo assim, existem misturas formuladas de concreto asfáltico especificamente para serem camadas de superfície, como as seguintes:

- Misturas finas (*Béton Bitumineux Mince* - BBM);
- Misturas muito finas (*Béton Bitumineux Très Mince* - BBTM);
- Concretos asfálticos drenantes (*Béton Bitumineux Drainant* - BBDr);
- Misturas ultra finas (*Béton Bitumineux Ultra Mince* - BBUM).

E existem as misturas asfálticas formuladas de modo a privilegiar as funções estruturais do pavimento, tais com as seguintes:

- Misturas asfálticas de módulo elevado para camadas de base (*Enrobés à Module Elevé* - EME);
- Misturas *grave-bitume* para camadas de base (*Grave-Bitume* – GB).

Tendo em conta a grande diversidade de misturas para aplicar nos pavimentos, o presente trabalho fixa a atenção na preparação de misturas asfálticas com função estrutural. Na situação particular do Brasil, e parte da Colômbia, que são países tropicais quentes, e considerando que há uma corrente de engenheiros de pavimentos que está buscando empregar ligantes asfálticos mais duros, o presente estudo fixa atenção no uso dos cimentos asfálticos de elevada consistência na preparação de misturas asfálticas com função estrutural, de base e sub-base (*foundation*).

A metodologia por ensaios fundamentais de preparação de misturas asfálticas, em primeiro nível, verifica a habilidade à compacidade e a sensibilidade da mistura à água; em segundo nível, verifica a resistência à deformação permanente; em terceiro nível, determina o módulo complexo da mistura no espectro de temperaturas de -10°C a 40°C e no espectro de frequência de 1Hz a 30Hz; e no último nível, realiza a avaliação da mistura à fadiga, notadamente para rodovias com tráfego pesado e canalizado.

Em se tratando de metodologia por ensaios fundamentais, os resultados destes são empregados no dimensionamento da estrutura do pavimento que é realizada segundo as metodologias desenvolvidas pelo *Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA)* e *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*.

Neste contexto, o estudo ocupa-se com a avaliação do comportamento mecânico de duas misturas de concreto asfáltico: uma denominada de *grave-bitume* (GB) e outra denominada de módulo elevado (EME), ambas utilizando ligantes asfálticos de elevada consistência (*grave-bitume* com ligante do tipo CAP 30/45 e EME com ligante de resíduo de vácuo com penetração 10/20) e preparadas utilizando a metodologia de formulação por ensaios fundamentais.

Para a efetiva avaliação das misturas serão determinados os parâmetros viscoelásticos intrínsecos às misturas asfálticas para definir o modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh. Estes parâmetros serão aplicados na modelação das respostas do pavimento considerando a carga em movimento (velocidade de deslocamento), e as temperaturas no programa *ViscoRoute* desenvolvido pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)*.

## **1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Avaliar o desempenho mecânico de misturas asfálticas preparadas com ligantes de elevada consistência quanto aos parâmetros intrínsecos: módulo complexo e fadiga.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo principal, aplicar a metodologia francesa de formulação de misturas asfálticas e cumprir os requerimentos nos níveis de formulação para misturas de módulo elevado (EME 2) e *grave-bitume* (GB 3) utilizando as normas NF P 98-140, 1992 e NF P 98-138, 1992 respectivamente, de maneira que as misturas alcancem o melhor desempenho. Para isto, são fixados os seguintes objetivos específicos:

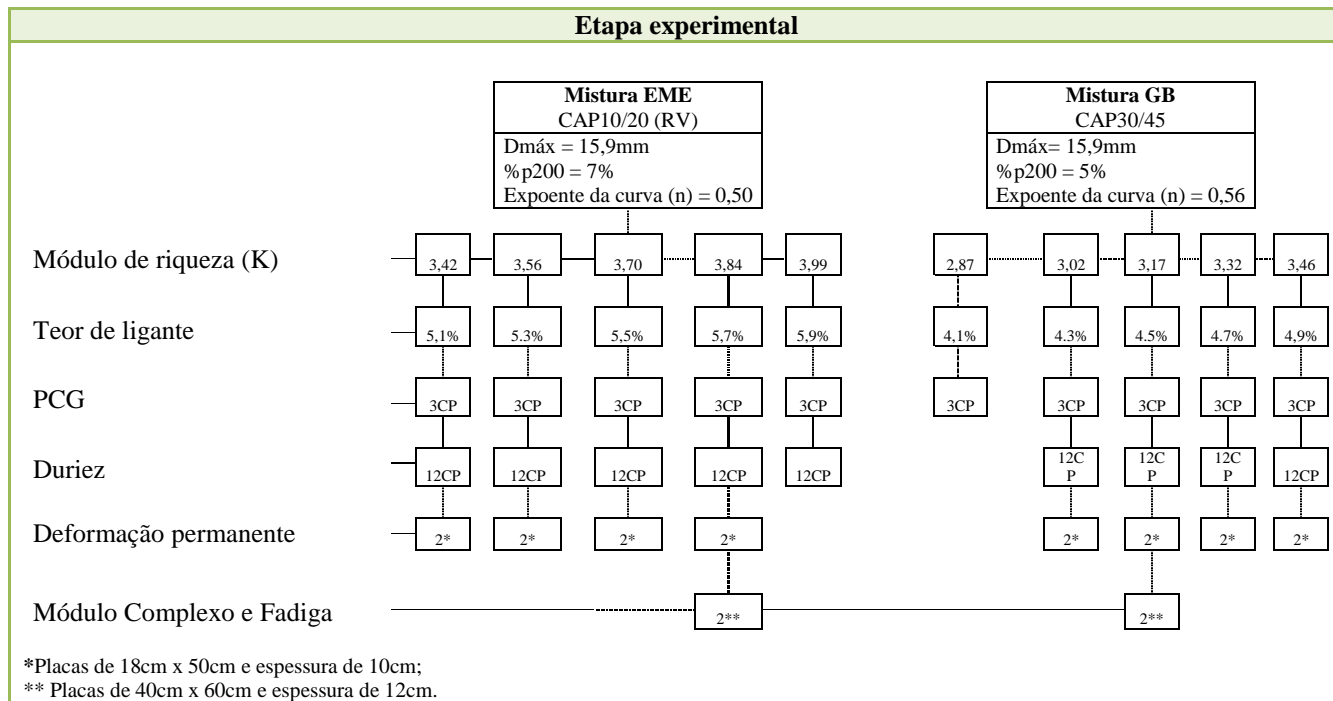
- Definir a distribuição granulométrica para cada tipo de mistura, através da equação de Fuller-Talbot.

- Definir os teores mínimos de ligantes a partir do conceito de módulo de riqueza, da superfície específica e da massa volumétrica dos granulares. Avaliar, com incrementos de 0,2%, cinco teores diferentes para cada mistura na sequência de ensaios de formulação.
- Avaliar a compacidade das misturas asfálticas no ensaio de compactação por cisalhamento giratório (PCG) (NF P 98-252, 1999) em função do teor de ligante para cada composição granulométrica.
- Avaliar a sensibilidade à água no ensaio Duriez (NF P 98-251-1, 1995) das misturas que cumpram o critério de compacidade no ensaio de compactação por cisalhamento giratório.
- Realizar ensaios de deformação permanente (NF P 98-253-1, 1993), moldando duas placas por cada composição a avaliar.
- Determinar o módulo complexo da mistura de módulo elevado e da mistura *grave-bitume* utilizando a norma (NF P 98-260-2, 1992), sendo previamente selecionado nos níveis de formulação um teor de ligante para cada tipo de mistura. Realizar os ensaios de módulo complexo mediante deslocamento senoidal controlado e flexão alternada, no espectro de temperaturas de -10°C a 40°C e frequências de 1Hz a 30Hz.
- Realizar ensaios de fadiga das misturas utilizando a norma (NF P 98-261-1, 1993), mediante flexão alternada em modo contínuo e deslocamento controlado. Avaliar três níveis de deformação para cada curva de fadiga (mistura de módulo elevado e mistura *grave-bitume*) e desenhar em escala logarítmica o nível de deformação versus número de ciclos correspondente com o critério de ruptura e determinar a curva de fadiga característica de cada material.
- Dimensionar uma estrutura de pavimento hipotética através dos procedimentos normativos do manual de dimensionamento Francês desenvolvido pelo *Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA) e *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* (LCPC). Verificar as respostas da estrutura do pavimento pela

aplicação do programa ViscoRoute que considera a carga em movimento e comportamento viscoelástico das camadas de concreto asfáltico através do modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh.

A Figura 1, apresenta o resumo dos ensaios executado para alcançar o objetivo.

**Figura 1.** Resumo da matriz de ensaios.





### 1.3 RELEVÂNCIA DO TEMA

A pesquisa aprimora no conhecimento do comportamento reológico e na fadiga de misturas asfálticas formuladas com ligantes de elevada consistência, com ensaios específicos da metodologia francesa, empregando materiais diretamente de usina sem nenhuma modificação dos ligantes.

A formulação das misturas de concreto asfáltico é realizada de acordo com sua função estrutural para camada de base e sub-base (*foundation*), de maneira que alcancem as melhores características mecânicas desejáveis, em relação ao módulo complexo e a resistência à fadiga das misturas *grave-bitume* e de módulo elevado produzidas com ligantes de elevada consistência CAP 30/45 e resíduo de vácuo com penetração 10/20.

Estas misturas têm a particularidade de apresentar tanto elevada rigidez quanto sua resistência em fadiga. O emprego de misturas de elevada rigidez e resistência à fadiga, além de permitir a construção de pavimentos de melhor qualidade, contribui no aumento da vida útil dos pavimentos, possibilitando reduzir as espessuras das camadas em rodovias de tráfego canalizado ou extremamente pesado. Na concepção destas misturas é comum utilizar ligantes de maior consistência ao invés de asfaltos convencionais por serem menos suscetíveis termicamente.

Os grandes volumes de tráfego, as cargas elevadas e os grandes gradientes de temperatura produzem a deterioração prematura do pavimento, sendo mais interessante utilizar ligantes de maior consistência onde teoricamente são menos suscetíveis às variações de temperatura e resistentes a problemas associados à deformação permanente sob condições de temperaturas elevadas.

Dois parâmetros que estão intimamente ligados ao dimensionamento e comportamento do pavimento são a rigidez, que é levada em conta através do módulo complexo por tratar-se de um material viscoelástico e a deformação admissível determinada a partir do ensaio de fadiga em flexão alternada. Neste trabalho são verificadas no dimensionamento as respostas do pavimento, considerando seu comportamento viscoelástico e a carga em movimento de uma maneira mais racional.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está organizado da seguinte forma:

**Capítulo 1:** Introdução ao tema de pesquisa vislumbrando ao leitor os objetivos e o enfoque da pesquisa.

**Capítulo 2:** Formulação de misturas asfálticas – Metodologia Francesa. É feita uma breve descrição dos níveis de formulação, propriedades mecânicas das misturas asfálticas de módulo elevado e misturas *grave-bitume* e uma breve revisão das experiências com ligantes de elevada consistência.

**Capítulo 3:** Comportamento mecânico dos concretos asfálticos. É realizada uma revisão dos tipos de estruturas de pavimentos, tipos de solicitações, comportamento viscoelásticos dos concretos asfálticos, e a influência dos constituintes no comportamento da mistura.

**Capítulo 4:** Materiais e metodologia. É realizada uma descrição dos materiais, formulação e composição das misturas que foram objeto da pesquisa, curvas granulométricas, descrição da seqüência de ensaios e procedimentos laboratoriais.

**Capítulo 5:** Resultados Experimentais. São apresentados os resultados do ensaio de compactação por cisalhamento giratório, de sensibilidade à água no ensaio Duriez, de profundidade de afundamento no ensaio de deformação permanente, a representação gráfica do ensaio de módulo complexo e as curvas de fadiga das misturas ensaiadas.

**Capítulo 6:** Exploração dos resultados. É realizada a discussão dos resultados experimentais, representação do modelo reológico de comportamento viscoelástico de Huet Sayegh e dimensionamento racional do pavimento considerando variáveis intrínsecas ao material, módulo complexo e resistência à fadiga.

**Capítulo 7:** Conclusões

## **2 FORMULAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS**

### **2.1 INTRODUÇÃO**

As misturas asfálticas utilizadas na França são definidas pelas normas e caracterizadas por abordagem através de ensaios fundamentais, verificando o desempenho da mistura asfáltica em cada nível de formulação.

Como materiais estruturais podem ser classificados como uma abordagem fundamental, sendo realizada inicialmente uma análise volumétrica da mistura levando em conta o uso da prensa de compactação por cisalhamento giratório. Este ensaio direciona a formulação da mistura e pode ser utilizado para todos os tipos de misturas usinadas a quente.

Este contexto é caracterizado pela diversidade de pavimentos e técnicas usadas na formulação de misturas asfálticas como, por exemplo: bases de camadas tratadas com cimento hidráulico ou betuminoso, material granular não tratado e pavimentos de concreto hidráulico (SETRA-LCPC, 1997). A partir dos componentes selecionados (agregados, material de enchimento, ligantes e aditivos) é realizada uma sequência de ensaios para descrever o comportamento da mistura asfáltica.

Esta sequência é escolhida com base no nível de ensaio requerido, de 1 até 4, realizando-se alternativamente ensaios complementares. O nível de ensaio depende geralmente do tipo de mistura, da posição da camada, da mistura asfáltica, da espessura, e tráfego previsto (LCPC, 2007).

As camadas de concreto asfáltico são concebidas segundo a função que vão desempenhar no pavimento, seja em camadas com função de superfície ou de função estrutural. Em conjunto procuram-se as qualidades de um bom pavimento garantindo segurança, conforto e durabilidade. Esta concepção centra-se no desempenho e nas características mecânicas da mistura, através do ensaio de módulo complexo, estudado segundo a norma (NF P 98-260-2) e a fadiga do material através do ensaio (NF P 98-261-1) (SETRA-LCPC, 1997).

Os parâmetros medidos experimentalmente das misturas asfálticas, a rigidez medida no ensaio de módulo complexo e a deformação admissível calculada a partir dos dados experimentais do ensaio de fadiga para um número de eixos equivalentes, são utilizadas de maneira direta no dimensionamento da estrutura do pavimento.

Segundo a metodologia de formulação francesa, três factores estão fortemente ligados e interdependentes:

- O primeiro concerne ao grupo de propriedades físicas, químicas e mecânicas consideradas como necessárias para avaliar o desempenho dos constituintes e da mistura;
- O segundo ao grupo dos ensaios e métodos para fazer a medição das propriedades volumétricas e mecânicas;
- O terceiro ao grupo de valores admissíveis determinados experimentalmente, os quais são função das propriedades requeridas para o dimensionamento.

## 2.2 NÍVEIS DE FORMULAÇÃO

A percentagem de vazios ou compacidade da mistura é o parâmetro mais importante na sua formulação, uma vez que as propriedades mecânicas são dependentes das relações volumétricas do esqueleto granular e do tipo de ligante.

A percentagem de vazios ou a compacidade avaliada no ensaio de compactação por cisalhamento giratório é a primeira exigência para uma mistura asfáltica. Esta exigência relaciona-se às características procuradas de textura (aderência), durabilidade (resistência à água, resistência à fadiga, e deformação permanente), e varia em relação ao tipo de mistura, função e solicitações a que será submetida (LCPC, 2007).

A dosagem das misturas asfálticas é um processo que começa com a seleção dos componentes que normalmente são definidos pela disponibilidade local ou pelo projetista. O conhecimento das características da mistura é importante, sendo útil para ajustar sua composição de maneira que os resultados sejam consistentes com as especificações para a mistura estudada. O procedimento envolve a adaptação da fórmula, que posteriormente se junta aos ensaios especificados para o teste e nível de formulação respectivo.

Os níveis de formulação da metodologia francesa são:

No nível 0 corresponde às especificações e características mínimas dos constituintes da mistura (ligantes, granular graúdo, fino e filer). No nível 1 avalia-se a habilidade com que a mistura aceita

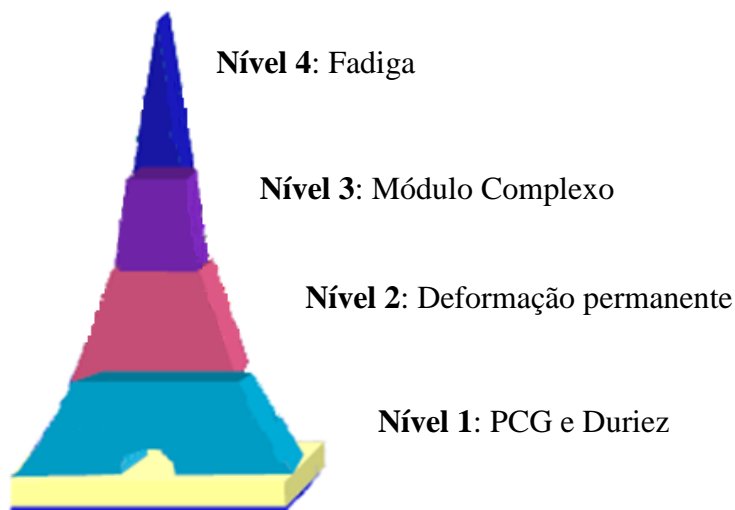
compactação, no ensaio de compactação por cisalhamento giratório e a sensibilidade à água da mistura asfáltica no ensaio de imersão e compressão simples Duriéz. No âmbito da normalização francesa o princípio do ensaio de compressão simples consiste na compactação por pressão estática de dupla ação. Um lote de corpos-de-prova são conservados a 18°C, em umidade controlada, e outro lote é submerso na água a 18°C. É determinada a relação entre as resistências seco e submerso. A resistência a seco e a compactação são indicadores adicionais ao ensaio de compactação por cisalhamento giratório.

No nível 2 avalia-se o potencial de afundamento no ensaio de deformação permanente. Realizado em condições controladas de temperatura, este nível pode ser avaliado nos 10000 ciclos ou nos 30000 ciclos, isto é função do tipo de mistura asfáltica. Para o ensaio de deformação permanente, o corpo-de-prova é uma placa retangular de 5 cm ou 10 cm de espessura e dimensões 18cmx50cm. A placa é submetida à passagem de uma roda equipada com um pneumático a uma frequência de 1Hz, carga de 5kN, pressão de 6 bar e temperatura controlada de 60°C. As especificações abrangem uma percentagem de máxima para a profundidade do afundamento para um determinado número de ciclos, dependendo do tipo e classe de mistura asfáltica.

No nível 3 verifica-se a rigidez da mistura asfáltica, determinada pelo módulo complexo através de solitação sinusoidal em corpos-de-prova trapezoidais ou por tração uniaxial em corpos de prova cilíndricos. Este ensaio permite desenhar a curva representativa do material e conhecer a rigidez da mistura em um amplo espectro de tempos de carga ou de frequências.

O nível 4 corresponde ao ensaio de fadiga realizado sobre corpos-de-prova trapezoidais a uma temperatura de 10°C e 25Hz. Este último nível de formulação centra-se na determinação da deformação do material para um milhão de solitações ( $\epsilon_6$ ). Este ensaio é realizado em flexão alternada e deformação senoidal de amplitude constante (deformação controlada).

A Figura 2, ilustra os níveis da formulação dos concretos asfálticos segundo a metodologia francesa.



**Figura 2.** Resumo dos níveis de formulação (LCPC, 2007).

### 2.3 MISTURAS ASFÁLTICAS COM FUNÇÃO DE SUPERFÍCIE

A separação das camadas, segundo sua função, permite formular misturas asfálticas com características superficiais que garantam segurança e conforto, com a possibilidade da seleção da mistura mais adequada para cada projeto específico, deixando a resistência mecânica para as camadas com função estrutural.

A camada de superfície deve garantir suficiente macrotextura e microtextura, assegurando a aderência entre o pneu e o pavimento na frenagem do veículo e em condições climáticas variadas de chuva e temperatura. As microtexturas são as asperezas da superfície com dimensões de comprimento de onda de 0,0 a 0,5mm no domínio da textura do agregado mineral. A microtextura indica a propriedade dos agregados em apresentar uma superfície áspera capaz de perfurar o filme da água da chuva residual no contato do pneu com o pavimento e oferecer atrito entre eles. A dirigibilidade é conseguida pela microtextura, pois permite a estabilidade veicular nas acelerações e desacelerações (MOMM, 1998).

No grupo de misturas asfálticas, concebidas com características funcionais de superfície na metodologia de formulação de misturas francesas, distinguem-se:

- Misturas para camadas de rolamento convencional ou para camadas de ligação: *Béton Bitumineux Semi-Grenu* (EB-BBSG),

*Béton Bitumineux pour chaussée Souple à faible trafic* (EB-BBS),  
*Béton Bitumineux à Module Élevé* (EB-BBME);

- Camadas delgadas para camadas de rolamento: *Béton Bitumineux Mince* (EB-BBM); *Béton Bitumineux Très Mince* (BBTM); *Béton Bitumineux Ultra Mince* (BBUM);
- Camadas drenantes: *Béton Bitumineux Drainant* (BBDr).

Cada uma delas subdivide-se em classes e os níveis de formulação e especificações variam de acordo com cada tipo de mistura.

## 2.4 MISTURAS ASFÁLTICAS COM FUNÇÃO ESTRUTURAL

As camadas do pavimento são projetadas para que, em conjunto, resistam às solicitações impostas pelo tráfego e às condições ambientais. As camadas de base e sub-base (*foundation*) são as responsáveis por dissipar a intensidade da carga levando esta a um nível admissível ao solo de fundação.

Estas camadas são geralmente construídas com materiais não tratados, ou tratados com ligante hidráulico, conveniente quando o volume de tráfego e a intensidade da carga são baixos. Uma solução alternativa para rodovias de tráfego pesado e intenso é utilizar camadas asfálticas espessas para as camadas de base e sub-base (*foundation*), sendo utilizadas na França as misturas de módulo elevado e as misturas *grave-bitume* para este propósito.

Estas misturas têm a particularidade de utilizar ligantes de elevada consistência, geralmente ligante CAP10/25 para misturas de módulo elevado (EME) e ligante CAP30/45 para misturas *grave-bitume* (GB) podendo ser utilizado também CAP50/70.

### 2.4.1 Misturas asfálticas de módulo elevado (*Enrobés à Module Élevé* NF P98-140)

As misturas de módulo elevado constituem uma técnica moderna, particularmente de desempenho para aplicar em situações de tráfego agressivo, contribuindo ao conceito de desenvolvimento durável à redução das espessuras, o que conduz a uma economia (BROSSEAUD, 2006). Estas misturas tiveram sua origem na França, com o objetivo inicial de reforçar rodovias existentes com misturas do tipo BBME, sendo aplicadas nas camadas de superfície (ligação ou de rolamento).

Isto permitiu que, paralelamente, fossem desenvolvidas as misturas de módulo elevado para pavimentos novos utilizadas nas camadas estruturais (base e sub-base) do pavimento.

A norma francesa de misturas de módulo elevado (NF P 98-140) prevê duas classes de misturas. A classe 1, que é similar a uma mistura GB classe 2 com baixo teor de ligante. E a classe 2, com que têm uma dosagem em ligante mais elevado, conduzindo a uma percentagem de vazios menor e uma boa resistência à fadiga. A rigidez do ligante aporta um módulo elevado e boa resistência à deformação permanente, conduzindo a uma redução das espessuras das camadas do pavimento (SETRA-LCPC, 1997).

As espessuras das camadas são calculadas racionalmente, porém existem recomendações quanto à espessura mínima de utilização em função do tamanho máximo nominal da composição granulométrica. Segundo a granulometria podem-se formular três tipos de misturas em função do tamanho máximo do agregado 0/10, 0/14 ou 0/20. As espessuras são compreendidas entre 6cm e 8cm para uma mistura EME 0/10, entre 7cm e 13cm para uma misturas EME 0/14 e entre 9cm até 15cm para uma mistura EME 0/20.

A percentagem de vazios é inferior a 10% para a mistura de módulo elevado classe 1 e inferior a 6 % para a mistura de módulo elevado classe 2. Cada classe tem um nível de propriedades mecânicas diferentes, que são procuradas na formulação através dos diferentes ensaios dependendo da composição volumétrica da mistura. O teor de ligante mínimo é calculado a partir da superfície específica, da massa volumétrica dos granulares e do módulo de riqueza mínimo.

Para as misturas de módulo elevado classe 1 o módulo de riqueza mínimo é  $K = 2,5$ , em torno de 4,0% de ligante, e para as misturas de módulo elevado classe 2, o módulo de riqueza é  $K = 3,4$  em torno de 5,4% de ligante. Na Tabela 1, é apresentado os diferentes teores de ligantes em função da massa volumétrica dos granulares (MVR) de  $2,65\text{g/cm}^3$  e  $2,75\text{g/cm}^3$ .

**Tabela 1.** Teor mínimo de ligante para as misturas de módulo elevado (LCPC, 2007).

| Mistura  | EME 1<br>0/10 ou 0/14 | EME 1<br>0/20 | EME 2<br>0/10 ou 0/14 | EME 2<br>0/20 |
|--|-----------------------|---------------|-----------------------|---------------|
| Módulo de riqueza                                      | 2,5                   |               | 3,4                   |               |
| Teor de ligante mínimo<br>para MVR $2,65\text{g/cm}^3$ | 4,0                   | 4,0           | 5,4                   | 5,3           |
| Teor de ligante mínimo<br>para MVR $2,75\text{g/cm}^3$ | 3,9                   | 3,9           | 5,2                   | 5,1           |



As misturas de módulo elevado classe 1 são mais utilizadas onde existe fluxo de tráfego canalizado ou problemas de deformação permanente por ter um teor de ligante menor. As misturas de módulo elevado classe 2 têm desempenho superior sendo mais comum sua utilização (BROSSEAUD, 2006). As propriedades mecânicas para estas misturas estão apresentadas, na Tabela 2.

**Tabela 2.** Propriedade mecânica mínimas para misturas de módulo elevado (SETRA, 1997).

| Classe   | Granulometria      | r/R  | Módulo<br>15 C 10Hz (MPa) | Fadiga<br>10 C 25 Hz | Deformação<br>Permanente |     |
|----------|--------------------|------|---------------------------|----------------------|--------------------------|-----|
|          |                    |      |                           |                      | ciclos                   | %   |
| Classe 1 | 0/10, 0/14 ou 0/20 | 0,70 | 14000                     | 100                  | 30000                    | 7,5 |
| Classe 2 | 0/10, 0/14 ou 0/20 | 0,75 | 14000                     | 130                  | 30000                    | 7,5 |

r e R; Tensão de ruptura a compressão simples no ensaio Duriez, dos corpos de prova condicionados na água e a seco;

As propriedades do ligante são importantes nas características da misturas de módulo elevado, onde os ligantes utilizados devem ter uma penetração baixa 10/25 (1/10) mm, e aplica-se para camadas estruturais do pavimento nas camadas de base ou sub-base (*fundation*).

O valor do módulo complexo varia em função da temperatura e da frequência da solicitação para uma frequência constante em 10Hz e variando a temperatura de -10°C até 40°C, Pode-se acompanhar na Tabela 3, a tendência de diminuição do módulo complexo com o aumento da temperatura (SETRA-LCPC, 1997).

**Tabela 3.** Indicativo de variação do módulo a 10 Hz (MPa), para as diferentes temperaturas (SETRA-LCPC, 1997).

| Temperatura      | -10°C | 0°C   | 10°C  | 20°C  | 30°C | 40°C |
|------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| EME classe 1 e 2 | 30000 | 24000 | 17000 | 11000 | 6000 | 3000 |

O nível de formulação da mistura inicia-se pela seleção dos constituintes, que devem cumprir parâmetros característicos mínimos, definidos pelas respectivas normas de desgaste, angularidade, teor de finos, e poder de rigidificação. Neste contexto, as misturas de módulo elevado são avaliadas por parâmetros segundo o nível de formulação. Inicia-se com a verificação da composição granulométrica no ensaio de compactação por cisalhamento giratório, no qual a mistura de módulo elevado classe 1 deve ter um volume de vazios inferior a 10% para 80,

100, 120 giros em função do tamanho máximo do granular, e para a mistura de módulo elevado classe 2 inferior a 6%.

Uma vez ajustada a composição granulométrica, de maneira que garanta os requisitos de compacidade, é avaliada a resistência à água no ensaio Duriez, onde a relação entre a resistência a seco e úmido após de sete dias de condicionamento deve ser superior a 70%. O processo de formulação continua com a verificação da deformação permanente, onde as placas devem ter um volume de vazios inferior a 10% para a mistura de módulo elevado classe 1, e inferior a 6% para a mistura de módulo elevado classe 2. Sendo que a profundidade de deformação permanente após 30000 ciclos, sob condicionamento de temperatura a 60°C, deve ser inferior a 7,5% para os dois tipos de misturas. O módulo complexo medido a 15°C e 10Hz deve ser igual ou superior a 14000 MPa. E a deformação para um milhão de ciclos medida no ensaio de fadiga a 10°C e 25Hz, deve ser superior a 100µdef para a classe 1 e 130 µdef para a classe 2. Estes são parâmetros de formulação, sendo que no dimensionamento são utilizados os valores obtidos experimentalmente para cada tipo de mistura (Tabela 4).

**Tabela 4.** Resumo dos parâmetros da mistura de módulo elevado (LCPC, 2007).

| Classificação                                    |                                       |           | EME 1                    | EME 2                   |
|--|---------------------------------------|-----------|--------------------------|-------------------------|
| Relação da resistência r/R, (imersão compressão) |                                       |           | r/R ≥ 0,70               |                         |
| Prensa de compactação por cisalhamento giratório | EME 0/10                              | 80 giros  | % Vv ≤ 10%               | % Vv ≤ 6%               |
|  | EME 0/14                              | 100 giros |                          |                         |
|  | EME 0/20                              | 120 giros |                          |                         |
| Resistência à deformação Permanente a 60°C       | Porcentagem de vazios das placas:     |           | % Vvi= 7%                | % Vvi= 3%               |
|  | Número de ciclos                      |           | 30000 ciclos             | 30000 ciclos            |
|  | Profundidade da Deformação permanente |           | Afundamento máximo 7,5%  |                         |
| Porcentagem de vazios das placas                 |                                       |           | % Vvi= 7%<br>% Vvs = 10% | % Vvi= 3%<br>% Vvs = 6% |
| Módulo (MPa)                                     | 15°C, 10 Hz ou 0,02 s                 |           | E*  ≥ 14000              | E*  ≥ 14000             |
| Fadiga (µdef)                                    | 2 pontos, 10°C, 25 Hz                 |           | ε <sub>6</sub> ≥ 100     | ε <sub>6</sub> ≥130     |

r e R; Tensão de ruptura a compressão simples, dos corpos de prova condicionados na água e a seco;

Vv; Volume de vazios;

Vvi; volume de vazios mínimo;

Vvs; volume de vazios máximo;

ε<sub>6</sub>; deformação para um milhão de ciclos.

## 2.4.2 Misturas *Grave-Bitume* NF P98-139

A mistura *grave-bitume* (GB) é definida pela norma NF P 98-138. Existem quatro classes, dependendo da granulometria e teor de ligante. Nestes tipos de misturas geralmente é utilizado ligante de penetração CAP30/50, mas também pode ser utilizado ligante de penetração CAP50/70. Igual para as misturas de módulo elevado, o teor de ligante mínimo é definido em função do módulo de riqueza para cada tipo de mistura (SETRA-LCPC, 1997).

Esta é uma mistura para camadas de base e sub-base (*foundation*), dependendo da estrutura projetada. A mistura *grave-bitume* classe 1, por ter um teor de ligante muito baixo com módulo de riqueza igual a 2, é pouco utilizada. Cada classe é diferenciada segundo suas propriedades mecânicas, com teor de ligante crescente apresentados na Tabela 5, o que permite alcançar densidades mais elevadas com teor de vazios decrescentes (11%, 10% e 9%) máximos, respectivamente (BROSSEAUD, 2006).

**Tabela 5.** Teor de ligante mínimo para as misturas *grave-bitume* (LCPC, 2007).

| Mistura   | GB 2<br>0/14 | GB 2<br>0/20 | GB 3<br>0/14 | GB 3<br>0/20 | GB 4<br>0/14 | GB 4<br>0/20 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Módulo de riqueza                                     | 2,5          |              | 2,8          |              | 2,9          |              |
| Teor de ligante mínimo para MVR 2,65g/cm <sup>3</sup> | 4,0          | 4,0          | 4,5          | 4,4          | 4,7          | 4,6          |
| Teor de ligante mínimo para MVR 2,75g/cm <sup>3</sup> | 3,9          | 3,9          | 4,3          | 4,2          | 4,5          | 4,4          |

A curva granulométrica da mistura é um parâmetro importante na formulação, do qual depende o arranjo entre as partículas. Na metodologia Francesa de formulação de misturas existem valores máximos e mínimos recomendados na definição da curva granulométrica, uma vez que se deve avaliar sua compacidade no ensaio de compactação por cisalhamento giratório (Tabela 6).

**Tabela 6.** Granulométrica recomendada para misturas *grave-bitume* e módulo elevado, diâmetro máximo 14mm ou 20mm (LCPC, 2007).

| Peneira<br>Mm | Intervalos usuais |       |        |
|---------------|-------------------|-------|--------|
|               | mínimo            | médio | máximo |
| 6,3           | 50                | 53    | 70     |
| 4,0           | 40                | 47    | 60     |
| 2,0           | 25                | 33    | 38     |
| 0,063         | 5,4               | 6,7   | 7,7    |

O incremento do teor de ligante melhora o comportamento na fadiga e permite obter valores de resistência mais aceitáveis oferecendo um melhor comportamento. São mais utilizadas as misturas *grave-bitume* classe 3 e 4. As propriedades mecânicas para este tipo de misturas é apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7.** Propriedade mecânica mínimas para misturas *grave-bitume* (LCPC, 2007).

| Classe   | Granulometria | r/R  | Módulo<br>15°C 10Hz (MPa) | Fadiga<br>10°C 25 Hz | Deformação<br>Permanente |    |
|----------|---------------|------|---------------------------|----------------------|--------------------------|----|
|          |               |      |                           |                      | Ciclos                   | %  |
| Classe 2 | 0/14 ou 0/20  | 0,65 | 9000                      | 80                   | 10000                    | 10 |
| Classe 3 | 0/14 ou 0/20  | 0,70 | 9000                      | 90                   | 10000                    | 10 |
| Classe 4 | 0/14 ou 0/20  | 0,70 | 11000                     | 100                  | 30000                    | 10 |

r e R; Tensão de ruptura a compressão simples no ensaio Duriez, dos corpos de prova condicionados na água e a seco;

As espessuras das camadas recomendadas podem variar segundo o tamanho máximo do granular. Para granulometria 0/14 a espessura recomendada pode variar entre 8cm e 12cm, e para misturas com granulometria 0/20 a espessuras pode variar entre 10cm até 15cm (LCPC, 2007).

A influência predominante da temperatura no comportamento da mistura asfáltica, é evidenciada no ensaio do módulo complexo, permitindo ter um espectro do comportamento do material a diferentes temperaturas, um indicativo da variação do módulo medido a diferentes temperaturas e na frequência de 10Hz é apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8.** Indicativo de variação do módulo complexo a 10 Hz (MPa), para as diferentes temperaturas (SETRA-LCPC, 1997).

| Temperatura     | -10°C | 0°C   | 10°C  | 20°C | 30°C | 40°C |
|-----------------|-------|-------|-------|------|------|------|
| EB-GB1          | 18000 | 14000 | 9000  | 5000 | 2000 | 800  |
| EB-GB2 e EB-GB3 | 23000 | 18800 | 12300 | 6300 | 2700 | 1000 |

O resumo dos parâmetros de formulação é apresentado na Tabela 9. Os parâmetros volumétricos são avaliados inicialmente na prensa de compactação por cisalhamento giratório, sendo o volume de vazios no nível dos 100 giros inferior a 11%, 10%, e 9% para as misturas *grave-bitume* classe 2, 3, 4 (denominadas GB 2, GB 3, GB 4, respectivamente). A resistência à água deve ser superior a 70% para as três classes de

misturas. A resistência à deformação permanente no nível dos 10000 ciclos deve ser inferior a 10% para as misturas classe 2 e 3, e inferior a 10% no nível dos 30000 ciclos para a mistura classe 4. O módulo complexo deve estar acima de 9000MPa para as misturas classe 2 e 3, e acima de 11000MPa para as misturas classe 4 a uma temperatura de 15°C e frequência de 10Hz. A deformação para um milhão de ciclos ( $\epsilon_6$ ) determinada no ensaio de fadiga a 10°C e 25Hz deve ser igual ou superior a 80 $\mu$ def, 90 $\mu$ def, e 100 $\mu$ def, para as classes 2, 3 e 4, respectivamente.

A porcentagem de vazios dos corpos-de-prova destinados para a realização de ensaios de deformação permanente, para os ensaios de módulo e de resistência à fadiga deve responder a especificações concernentes à porcentagem de vazios.

**Tabela 9.** Resumo dos parâmetros da mistura *grave-bitume* (LCPC, 2007).

| Classificação                                |                       |             | GB 2                     | GB 3         | GB 4         |
|--|-----------------------|-------------|--------------------------|--------------|--------------|
| Relação de resistência, (imersão compressão) |                       |             | r/R ≥ 0,70               |              |              |
| Compactação Por cisalhamento giratório       | GB 0/14               | 100 giros   | % Vv ≤ 11%               | % Vv ≤ 10%   | % Vv ≤ 9%    |
|  | GB 0/20               | 120 giros   |                          |              |              |
| Deformação permanente a 60°C                 | % Vv das placas:      |             | % Vvi =8%                | % Vvi = 7%   | % Vvi = 5%   |
|  |                       |             | % Vvs =11%               | % Vvs = 10%  | % Vvs = 8%   |
|  | Número de ciclos      |             | 10000 ciclos             | 10000 ciclos | 30000 ciclos |
|  |                       | Afundamento | Afundamento máximo 10,0% |              |              |
| Porcentagem de vazios das placas             |                       |             | % Vvi = 7%               | % Vvi = 7%   | % Vvi = 5%   |
|  |                       |             | % Vvs = 10%              | % Vvs = 10%  | % Vvs = 8%   |
| Módulo (MPa)                                 | 15°C, 10 Hz ou 0,02 s |             | E*  ≥ 9000               | E*  ≥ 9000   | E*  ≥ 11000  |
| Fadiga (µdef)                                | 2 pontos, 10°C, 25 Hz |             | ε6 ≥ 80                  | ε6 ≥ 90      | ε6 ≥100      |

r e R; Tensão de ruptura a compressão simples, dos corpos de prova condicionados na água e a seco;

Vv; Volume de vazios;

Vvi; volume de vazios mínimo;

Vvs; volume de vazios máximo;

$\epsilon_6$ ; deformação para um milhão de ciclos.

## 2.5 EXPERIÊNCIAS NA UTILIZAÇÃO DE LIGANTES DE ELEVADA CONSISTÊNCIA

Com o propósito de compreender melhor os efeitos das mudanças do tráfego, a influência do ligante e a configuração das cargas, no desempenho do pavimento, a França tem avaliado há anos, tanto experimentalmente como em pistas de testes, o comportamento dos materiais empregados na estrutura do pavimento. Este conhecimento

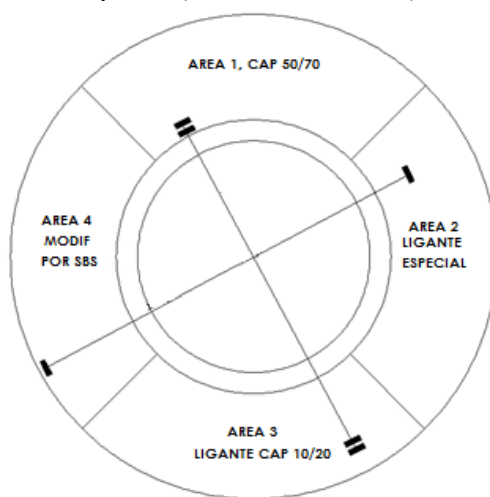
permite contar com uma relação laboratório/campo conhecida e a pertinência dos ensaios de laboratório.

Nos anos de 1992 a 1994 três experiências foram realizadas com o uso de ligantes asfálticos puros e modificados, na área 1 CAP 60/70 puro, na área 2 *Shell multigrade binder*, na área 3 CAP 10/20, a área 4 ligante modificado por polímero SBS. A composição das camadas das quatro áreas é descrita na Tabela 10.

**Tabela 10.** Configurações das pista experimental testada na França 1992-1994 (Corte et al., 1994).

| AREA I, II, III                     | AREA IV                           |
|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 8cm – BB                            | 2,5cm BBTM                        |
| 20cm – GB 0/14 (4,6% ligante 35/50) | 14cm EME 0/14                     |
| 20cm – GC 0/20 (3,9% cimento)       | 20cm GB 0/14 (4,6% ligante 35/50) |
| 20cm – GRH 0/20                     | 20cm GC 0/20 (3,9% cimento)       |
| Solo argila arenosa                 | 20cm GRH 0/20                     |
| -                                   | Solo argila arenosa               |

A Figura 3, ilustra o desenho esquemático da pista experimental, os resultados experimentais para as diferentes temperaturas, tipos eixos (simples e duplos) e a velocidade de carregamento, mostraram elevado desempenho da estrutura de pavimento projetada com ligante CAP 10/20 e a melhora do comportamento mecânico do pavimento com espessuras de pavimentos adequadas (CORTE et al., 1994).



**Figura 3.** Configurações da pista experimental testada na França 1992 a 1994 (Corte et al., 1994).

A área 1, composta com ligante convencional CAP 50/70 apresentou deformações em torno de 12mm. As áreas 2 e 4 apresentaram valores de deformação de 5mm a 7mm e na área 3, para a mistura de módulo elevado, as menores deformações que variaram entre 3mm a 5mm. Foi corroborado o efeito do tipo de ligante asfáltico na resistência à trilha de roda, obtendo bom resultados com o uso de ligante CAP10/20. Também se constatou a maior agressividade de eixos simples comparados com eixos duplos. Para as camadas com misturas de módulo elevado foi evidenciado que a resistência à fadiga está fortemente influenciada pela espessura da camada, isto é a maior espessura apresenta melhor comportamento na fadiga.

Na pavimentação francesa é comum a utilização de misturas asfálticas para as camadas de base e sub-base (*foundation*) do pavimento. A produção de misturas asfálticas de módulo elevado classe 1 e classe 2 entre os anos de 1989 a 1995, é apresentada na Tabela 11.

**Tabela 11.** Produção de misturas de módulo elevado de o ano 1989 a 1995 (SETRA, 1997).

| Ano  | EME (t)               |
|------|-----------------------|
| 1989 | 500.000               |
| 1990 | 1.100.000             |
| 1991 | 1.000.000             |
| 1992 | 1.500.000 – 1.900.000 |
| 1993 | 900.000               |
| 1994 | 1.100.000             |
| 1995 | 1.110.000             |

Depois do desenvolvimento das misturas asfálticas de módulo elevado na França, a utilização destas misturas têm sido adotada em diferentes países europeus como Portugal, Espanha e Reino Unido, em função das vantagens reconhecidas nas experiências francesas (ROHDE, 2007).

Com o uso de mistura de módulo elevado classe 2 na camada de base, há uma diminuição significativa da espessura da camada em aproximadamente 30%. Esta constatação foi realizada com simulador Hall-Fosse, com condições variáveis de temperatura, intensidade da carga, pressão de insuflagem dos pneus e tipo de eixo. As estruturas foram três seções correspondentes a: um trecho com camada de base de 11cm com uma mistura de módulo elevado classe 1 (EME1), um segundo trecho com camada de base de 14cm com mistura padrão da Suíça denominada *hot mix base course* (HMT) e um terceiro trecho com

camada de base de 7cm com mistura de módulo elevado classe 2 (EME2) (PERRET et al., 2004).

O desempenho elevado das misturas de módulo elevado foi avaliado por testes laboratoriais e de pistas experimentais acelerados a temperatura de temperatura elevada 50°C. Com o EME2, projetado para ter alta resistência à fadiga, observou-se que um elevado teor de mastique pode reduzir fortemente a resistência à deformação permanente (PERRET et al., 2004).

Na Tabela 12, são apresentadas propriedades mecânicas medidas em laboratório destas misturas. Com um módulo de riqueza de 2,7 para a mistura de módulo elevado classe 1, e 3,5 para a misturas de módulo elevado classe 2. Os valores de módulo para as mistura de módulo elevado EME 1 e EME 2 foram 15200 MPa e 15500 MPa, respectivamente, a 15°C e frequência de 10 Hz, mostrando pouca diferença entre estes valores. Porém, na deformação permanente obteve-se resultados significativos de 2,3% e 7,1%, respectivamente.

**Tabela 12.** Propriedades das misturas de módulo elevado estudadas por (PERRET et al., 2004).

| Ensaio  | HMT          | EME1          | EME2          |
|---|--------------|---------------|---------------|
| Módulo de riqueza                                     | 2,5          | 2,7           | 3,5           |
| Módulo complexo<br>15°C e 10Hz                        | 7500MPa      | 15200MPa      | 15500MPa      |
| Resistência à fadiga $\varepsilon_6$<br>a 10°C e 25Hz | 94 $\mu$ def | 133 $\mu$ def | 143 $\mu$ def |
| Deformação<br>permanente a 60°C,<br>30000 ciclos      | 5,7%         | 2,3%          | 7,1%          |

No Brasil tem-se estudado estas misturas através das pesquisas realizadas por MAGALHÃES (2004), FREITAS (2007) e ROHDE (2007). Nestas pesquisas as misturas são caracterizadas mecanicamente através dos ensaios de módulo de resiliência, resistência à tração estática por compressão diametral, fadiga por compressão diametral à tensão controlada e compressão axial estática (creep estático). Na Tabela 13 são apresentadas as curvas granulométricas utilizadas em suas pesquisas.



**Tabela 13.** Granulometrias de misturas de módulo elevado estudadas no Brasil (RODHE, 2007).

| Peneira<br>Mm | Rohde<br>2007 | Magalhães<br>2004 |
|---------------|---------------|-------------------|
| 19,10         | 100           | 97,1              |
| 12,70         | 86,4          | 82,5              |
| 9,50          | 76,1          | 78,0              |
| 4,76          | 55,7          | 53,0              |
| 2,00          | 39,0          | 35,4              |
| 0,40          | 16,7          | 19,4              |
| 0,18          | 10,9          | 12,4              |
| 0,075         | 6,3           | 6,3               |

A utilização de ligantes de elevada consistência modificados por EVA (AMP-EVA) e Resíduo Asfáltico de Petróleo (RASf), comparados com uma mistura de controle com CAP-20, aumentam até três vezes o módulo da mistura. Apresenta um desempenho elevado quanto à deformação permanente com valores compreendidos entre 3,0% a 4,5% de profundidade de afundamento (MAGALHÃES, 2004).

Misturas com utilização de CAP 30/45, Resíduo de Vácuo, CAP 30/45 com 4% de SASOBIT e utilização de escória de aciaria como agregado, resultam em características mecânicas mais elevadas que as misturas com ligantes convencionais, possibilitando a redução das espessuras das camadas do pavimento (FREITAS, 2007).

Pesquisas realizadas por RODHE (2007) na escala real e laboratorial caracterizando o comportamento mecânico das misturas asfálticas com cimento asfáltico RASf (Resíduo asfáltico por desasfaltação de propano), AMP EVA (CAP 20 modificado com 7.8% de polímero EVA) e PPA 30/45 (CAP 30/45 modificado com 1.2% de ácido polifosfórico) e uma mistura controle com CAP 50/70, mostrou um melhor desempenho para a mistura com resíduo de desasfaltação à propano (RASf).

Em uma segunda etapa laboratorial, foram analisados os ligantes asfálticos: RV (Resíduo de vácuo), PPA 50/70 (CAP 50/70 modificado 2% com ácido polifosforico), CAPPLUS 106B (ligante modificado por asfaltita). A utilização destes materiais pode resultar em estruturas de elevado desempenho e durabilidade para emprego em vias de elevado volume de tráfego ou tráfego lento e canalizado.

As misturas de módulo elevado oferecem uma boa resistência à deformação e constituem uma solução para camadas de base com espessuras de 7cm a 9cm. Os domínios de uso são em rodovias de tráfego pesado canalizado e lento como corredores de ônibus, vias

específicas de tráfego pesado, pátios de carregamento, pistas de portos, reforço de pavimentos de redes urbanas, camadas de base de pavimentos novos, reforço de autopistas de tráfego lento, pistas e zonas de circulação em aeroportos (BROSSEAUD, 2006).

As principais precauções que são destacadas são ter suporte com capacidade suficiente na compactação da mistura para suportar os efeitos da densificação da mistura, respeitar imperativamente as espessuras do dimensionamento e, especialmente, os limites de variações, assegurando uma proteção superficial por uma camada de superfície adaptado ao tráfego e clima (BROSSEAUD, 2006).

### **3 COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS**

#### **3.1 INTRODUÇÃO**

Os concretos asfálticos são constituídos de materiais granulares, finos (fíleres) e betuminosos. Estes são preparados segundo a função que vão desempenhar no pavimento. São concebidos como camadas de superfície (rolamento, ligação) ou como camadas de base e sub-base, em função do tipo de estrutura projetada, bem seja, para estrutura de pavimento simples com baixo e médio volume de tráfego ou para estrutura de pavimento com tráfego agressivo e intenso.

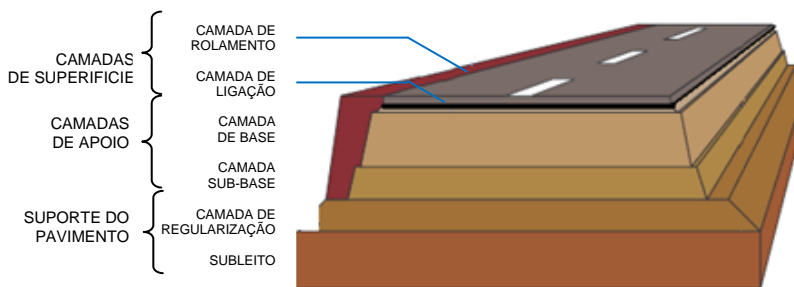
O pavimento se deteriora pela combinação dos efeitos repetidos de cargas dinâmicas do tráfego e agentes climáticos, dependendo da natureza e qualidade das diferentes camadas. Em situações de esforços elevados, a utilização de camadas de base e sub-base tratadas com cimento asfáltico com elevada deformação admissível e elevada rigidez, com comportamento plenamente conhecido, garantem a dissipação dos esforços gerados pelo tráfego a uma intensidade que possa ser suportada pelo solo de fundação.

A deformação rege o comportamento dos concretos asfálticos. As respostas das camadas de concreto asfáltico à passagem de uma carga em movimento na fibra inferior das camadas de base são de contração-distensão-contração, ou seja, existe uma alternância do sinal de deformação. Esta alternância do sinal varia com a velocidade do veículo (frequência da carga), pressão de insuflagem dos pneus, tipos de eixos e temperatura.

É necessário ter um bom conhecimento da natureza das solicitações, do tipo de resposta, assim como as deteriorações evoluem no tempo para compreender como se comporta a estrutura do pavimento, selecionando o melhor modelo de análise e cálculo (SETRA-LCPC, 1997). Ensaios no domínio frequencial permitem descrever o comportamento da maneira mais próxima às condições de carregamento real, em ensaios como módulo complexo, que permite conhecer a rigidez do material para amplo espectro de temperaturas, frequências e em ensaios de fadiga que permite avaliar a deformação para um determinado número de ciclos de solicitação.

As camadas devem ser projetadas de maneira que, em conjunto, dissipem a solicitação imposta, cada camada da estrutura deve ter características de módulo complexo e resistência à fadiga segundo sua posição dentro do pavimento, com uma redução gradativa de sua rigidez

a tal ponto que esforços aplicados no subleito sejam inferiores aos admissíveis, na Figura 4, é ilustrada de maneira geral a estrutura de pavimento Frances.



**Figura 4.** Corpo do pavimento numa estrutura multicamada (NGUYEN, 2008).

O suporte do pavimento é formado pelo subleito e eventualmente da camada de regularização, esta suporta o pavimento e tem a função de proteção ao subleito durante os trabalhos de adequação, permitindo melhorar sua qualidade, homogeneizando suas características mecânicas e melhorando sua capacidade de suporte (SETRA-LCPC, 1997).

A camada de apoio constituída pelas camadas de base e sub-base tem função estrutural e aportam resistência mecânica ao pavimento, dissipando as cargas induzidas pelo tráfego, distribuindo as pressões sobre o suporte, a fim de manter as deformações nos níveis admissíveis.

A camada de superfície é composta de uma camada de rolamento e, eventualmente, uma camada de ligação que assegura a colagem entre a camada de superfície e o corpo do pavimento. Esta camada garante a proteção da estrutura das infiltrações de água e agressividade do tráfego, definindo as características da superfície, proporcionando aderência, conforto, segurança, e diminuição do ruído.

Neste capítulo se faz uma breve descrição dos tipos de estruturas do pavimento de concreto asfáltico, comportamento dos concretos asfálticos sob solicitações dinâmicas, tipo de resposta do pavimento e ensaios de laboratório que simulam o comportamento viscoelástico no domínio frequencial dos concretos asfálticos, modelo reológico de comportamento viscoelástico e dimensionamento.

### 3.2 TIPOS DE ESTRUTURAS DO PAVIMENTO DE CONCRETO ASFÁLTICO

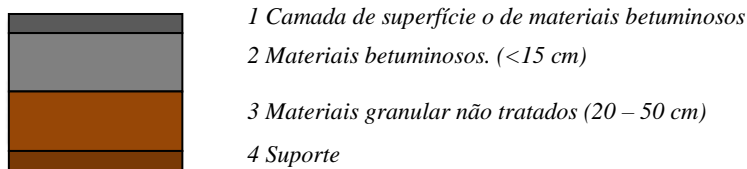
Segundo os tipos de materiais utilizados para as camadas estruturais, diferentes famílias de estruturas de pavimento podem ser definidas. Na França a estrutura é projetada segundo a utilização que vai ter em serviço e o nível das solicitações que serão impostas.

Para cada tipo de estrutura exemplos de desenho e orientação são dadas na *Guide Technique sur la Conception et le Dimensionnement des Structures de Chaussée* (SETRA-LCPC, 1994) e nos catálogos de estruturas tipos de pavimentos novos (LPC, 1998).

#### 3.2.1 Pavimento simples

As estruturas de pavimento simples são compostas de uma camada de superfície relativamente fina, inferior a 15 cm, e às vezes é reduzido a um recobrimento para pavimentos de baixo tráfego. Esta camada é apoiada sobre uma ou várias camadas de materiais granulares não tratados (GTN), a espessura total do pavimento geralmente está compreendida entre 30cm e 60cm, não sendo utilizadas em redes estruturantes, nem para situações de tráfego pesado (Figura 5) (SETRA-LCPC, 1997; SIMONIN, 2005).

Devido ao comportamento fortemente não linear, a brita não tratada pode ser utilizada como material de apoio do pavimento para baixo volume de tráfego (estrutura de pavimento simples), ou em camadas de sub-base (*foundation*) do pavimento para medio volume de tráfego (SETRA-LCPC, 1997; ABD, 2006).

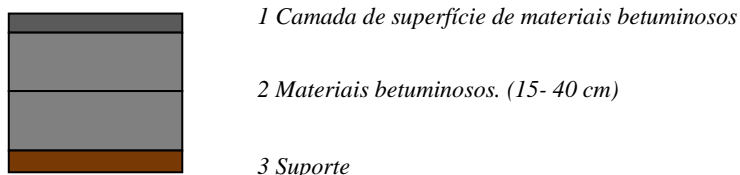


**Figura 5.** Pavimento simples (SETRA-LCPC, 1997).

#### 3.2.2 Pavimento com camadas asfálticas densas

É formada por uma camada de rolamento betuminoso sobre um corpo de camadas betuminosas, podendo ter uma ou duas camadas (base

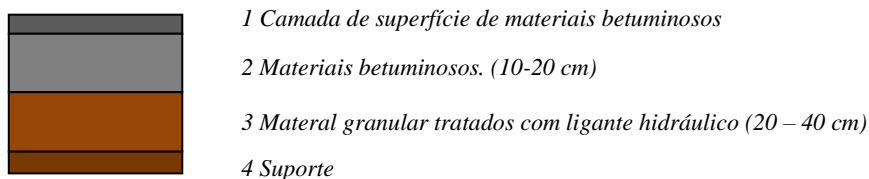
e sub-base). A espessura das camadas está compreendida entre 15cm a 40cm, e suportam tráfego elevado, sendo utilizadas para qualquer nível de tráfego (Figura 6) (SETRA-LCPC, 1997; SIMONIN, 2005).



**Figura 6.** Pavimento com camada betuminosa densa. (SETRA-LCPC, 1997).

### 3.2.3 Pavimentos de estrutura mista

É composto por uma camada de superfície e uma de base em materiais betuminosos (com espessura compreendida entre 10cm até 20cm) sobre uma camada de fundação em materiais tratados com cimento hidráulico (20cm a 40cm). Estas estruturas são qualificadas como mistas, se a espessura do material betuminoso em relação à espessura total é uma relação da ordem de 1/2. Estes pavimentos podem suportar um tráfego médio a pesado, e são mais utilizadas que as anteriores (Figura 7) (SETRA-LCPC, 1997; SIMONIN, 2005).

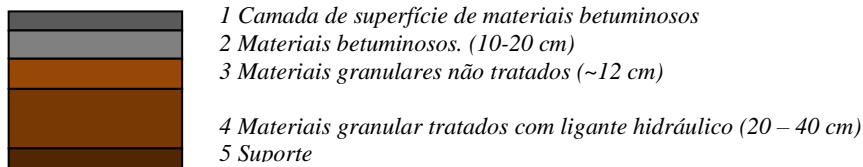


**Figura 7.** Pavimento estrutura mista (SETRA-LCPC, 1997).

### 3.2.4 Pavimento de estrutura inversa

É composto por camadas betuminosas de aproximadamente de 15cm de espessura, apoiada sobre brita não tratada de aproximadamente 12cm de espessura. O conjunto repousa sobre a camada de fundação em materiais tratados com cimento hidráulico. A espessura total está compreendida entre 60cm e 80cm. A camada do material não tratado ajuda a evitar a propagação das fissuras da camada de fundação através da estrutura. Esta estrutura é pouco utilizada, mesmo que, teoricamente,

possa suportar tráfego intenso (Figura 8) (SETRA-LCPC, 1997; SIMONIN 2005).

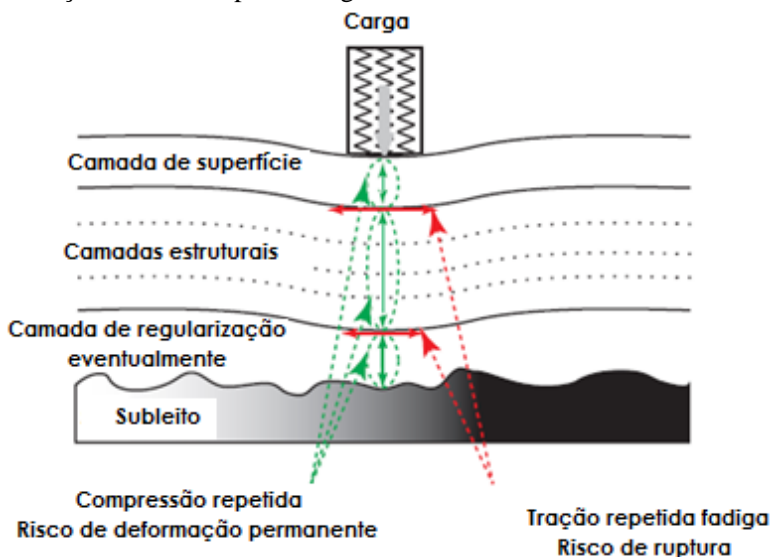


**Figura 8.** Pavimento de estrutura inversa (SETRA-LCPC, 1997).

### 3.3 SOLICITAÇÕES DINÂMICAS SOBRE O PAVIMENTO

#### 3.3.1 Solicitações em camadas de concreto asfáltico

Com a passagem das cargas rolantes cada camada do pavimento é submetida a esforços de tração e compressão. A tração repetida na base das camadas, sob o efeito da passagem dos veículos, produz a micro-degradação acumulada, provocando a falha do material e levando ao fenômeno de fadiga. (OLARD, 2003). Na Figura 9, são ilustradas as solicitações induzidas pelo tráfego.



**Figura 9.** Solicitações induzidas pelo tráfego (Di Benedetto, 1998).

A passagem de cada eixo gera compressões que acumuladamente podem criar deformações na superfície do pavimento. Este potencial de deformação das camadas é devido ao arranjo dos grãos e a natureza do ligante. Sob condições de temperatura severas, a capacidade dos materiais de se deformar aumenta, sendo maior o risco de deformação permanente. A falha pode-se dar pela consolidação dos materiais ou pela compensação e fluência dos mesmos.

O tempo de aplicação da carga é de curta duração, ocasionando esforços de flexão alternada no sentido longitudinal do carregamento. As tensões de tração surgem na base das camadas que o compõe e se repetem a cada passagem dos pneumáticos. A aplicação repetida da carga pode levar, em longo prazo, à fissuração por fadiga. (BAAJ, 2002).

Na Figura 10, é ilustrada, de forma geral, os sinais de deformação, estes se distinguem segundo a direção longitudinal ou transversal. Observa-se alternância com a passagem da carga de distensão para contração que depende da profundidade (PERRET, 2003).



**Figura 10.** Deformação das camadas com a passagem de uma roda simples (PERRET, 2003).

No ponto de aplicação da carga são geradas deformações tanto longitudinais como transversais, que podem ser medidas através de extensômetros colocados nas bases das camadas (PERRET, 2003).

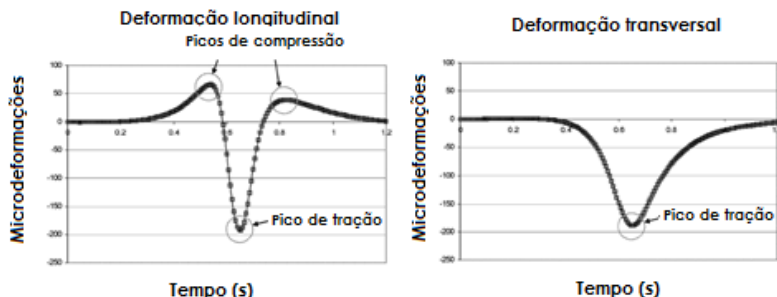
Para a camada de rolamento: distensão–contração–distensão.

Para a camada de base: contração–distensão–contração.

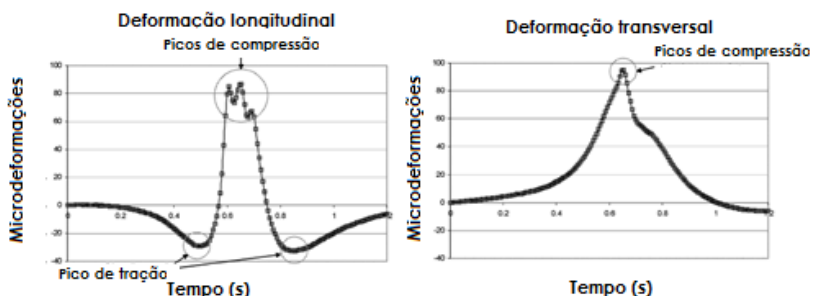
Com a passagem do veículo, é produzida uma inversão de sinal de deformação nas camadas do pavimento a qual depende das condições de carregamento. Isto é, a deformação da fibra inferior das camadas se dá de maneira alternada, tanto longitudinal como transversal, sendo função da posição da carga.



A amplitude do sinal de deformação é dependente da temperatura, da intensidade da carga, da pressão de insuflagem dos pneus, do tipo de eixo, do tipo de estrutura e dos materiais (PERRET, 2003). A Figura 11 e Figura 12, ilustram os sinais de deformação na fibra inferior das camadas de base e rolamento.



**Figura 11.** Sinais de deformação na fibra inferior da camada de base para temperatura de 30°C (PERRET, 2003).



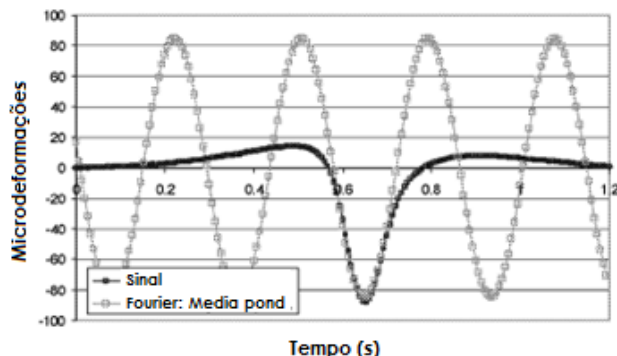
**Figura 12.** Sinais de deformação na fibra inferior da camada de rolamento para temperatura de 30C (PERRET, 2003).

Um fator que influi na vida em fadiga do pavimento está relacionado com o tempo de carregamento e de repouso. A distância entre os veículos conduz geralmente a tempos de repouso importantes, mesmo quando se trata de eixos múltiplos (tandem ou tridem). Dentro desta situação, e para velocidades elevadas, as solicitações induzidas pelo tráfego acumulam-se levando à fadiga do material (PERRET, 2003).

A velocidade de carga influi diretamente na modelação viscoelástica do material. O módulo do material betuminoso depende da velocidade de solicitação. A frequência relaciona a velocidade à qual a

carga se movimenta, sendo que um aumento na velocidade conduz a um aumento na frequência.

As frequências são diferentes segundo a direção das deformações longitudinal ou transversal, ao comparar o sinal de deformação longitudinal com as curvas sinusoidais, onde a frequência é escolhida a partir da decomposição em séries de Fourier, permite simular o sinal de deformação, esta superposição é ilustrada na figura 13 (PERRET, 2003).



**Figura 13.** Superposição do sinal de deformação (roda simples 5°C, 11,5 t e 8 bar), com a curva sinusoidal de frequência correspondente (PERRET, 2003).

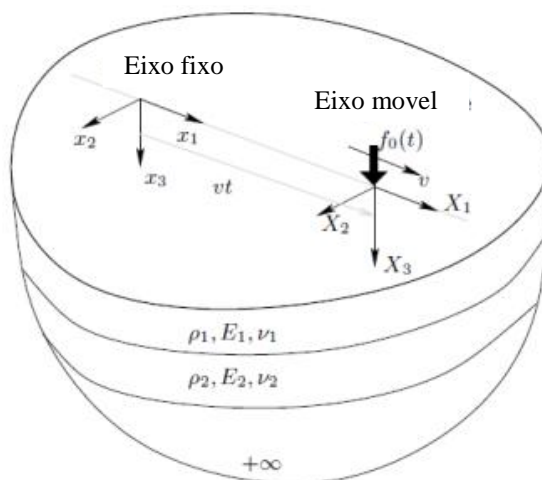
A estrutura do pavimento é solicitada dinamicamente para intensidades de carga e condições de temperatura variáveis. Através dos diferentes estudos, têm-se buscado interpretar de uma maneira mais realista as solicitações e o comportamento (respostas) sobre os pavimentos em ensaios experimentais de campo e laboratório, procurando reproduzir o efeito da carga em movimento sobre os concretos asfálticos. O ensaio realizado mediante flexão alternada reproduz em laboratório a deterioração por fadiga do material, sendo a força uma senóide de força e a resposta uma senóide de deformação.

Os ensaios de módulo complexo e resistência a fadiga sobre os materiais betuminosos são realizados a partir de solicitações senoidais, nos quais é escolhida uma frequência representativa, geralmente escolhida em função da velocidade da carga de acordo com o método de dimensionamento (SETRA-LCPC). É muito comum simplificar as condições reais de carregamento devido a sua complexidade. Em geral, tem-se preferido os sinais do tipo senoidal para a realização dos testes de fadiga e módulo complexo em laboratório.

A frequência é geralmente escolhida em função da velocidade da sollicitação. A forma do sinal de deformação experimental é comparada a uma curva sinusoidal, existindo outras formas de sinais utilizados em ensaios em laboratório como a haversenoidal, o carregamento cíclico e ou retangular.

### 3.3.2 Análise da carga em sistema móvel

No estudo da carga harmonia móvel sobre um semi-espço viscoelástico estratificado analítica e numericamente, ilustrada na Figura 14, As equações elastodinâmicas são solucionadas em um novo sistema de referência de coordenadas na posição da força, transforma-se as equações numa nova referência dentro do domínio para o número de ondas por uma transformação de Fourier, a solução final obtida pela transformação inversa de Fourier, permitindo estudar a resposta dinâmica linear em regime permanente de um espaço multicamadas para diferentes situações de velocidade e frequência de carga (NGUYEN, 2002).



**Figura 14.** Análise da carga em sistema móvel (NGUYEN, 2002).

Em um espaço multicamadas constituído por  $n$  camadas viscoelásticas a cada ponto  $x(x_1, x_2, x_3)$  dentro da camada  $i$  a equação elastodinâmica é escrita pela equação 1.

$$\mu \nabla^2 u(x, t) + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot u(x, t) + \rho g = \rho \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

A carga móvel aplicada sobre a superfície que se desloca a uma velocidade constante  $v$ , é uma carga harmônica e pode ser de dois tipos, pontal ou distribuída. A solução em regime permanente estacionário passa ao novo sistema, realizando troca de variáveis (equação 2) (NGUYEN, 2002).

$$x \rightarrow X = x - vte_1 \quad (2)$$

A solução harmonia estacionária  $u(x,t)$  dentro do sistema móvel pode ser representado por a equação 3.

$$u(x,t) = U(X,t) = U_0(X)e^{i\omega t} \quad (3)$$

Derivando  $u(x,t)$  com respeito ao tempo e substituindo equação a equação 3 e sua segunda derivada na equação elastodinâmica (equação 1). A equação elastodinamica no sistema em movimento torna-se numa equação estática diferencial, representada pela equação 4.

$$\mu \nabla^2 U + (\lambda + \mu) \nabla \nabla \cdot U + \rho \omega^2 U + 2i\rho\omega v \frac{\partial U}{\partial X_1} + \rho v \frac{\partial^2 U}{\partial X_1^2} = 0 \quad (4)$$

Esta equação também pode ser escrita dividindo-se  $\rho$ , representada pela equação 5.

$$c_s^2 \nabla^2 U + (c_p^2 - c_s^2) \nabla \nabla \cdot U + \omega^2 U + 2i\omega v \frac{\partial U}{\partial X_1} + v \frac{\partial^2 U}{\partial X_1^2} = 0 \quad (5)$$

Onde:

$\nabla^2$  = Operador de Laplace;

$c_p, c_s$  = velocidade das ondas de compressão e cisalhamento;

$u(x, t)$  = vetor de deslocamento ao ponto  $x$  no instante  $t$  ( $\{u_1, u_2, u_3\}^t$ );

$\rho$ , = densidade;

$\lambda, \mu$  = coeficientes elasticos de Lamé de la camada considerada;

$\rho g$  =força volumetrica.

O meio considera-se homogêneo dentro das duas direções  $X_1$  e  $X_2$ , aplicando a transformada de Fourier dentro destas duas direções.

$$U^*(k_1, k_2, X_3) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-ik_2 X_2} dX_2 \int_{-\infty}^{+\infty} U(X_1, X_2, X_3) e^{-ik_1 X_1} dX_1 \quad (6)$$

$$U(X_1, X_2, X_3) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ik_2 X_2} dk_2 \int_{-\infty}^{+\infty} U^*(k_1, k_2, X_3) e^{ik_1 X_1} dk_1 \quad (7)$$

Substituindo a equação 6 na equação 4 pode ser escrito a equação de equilíbrio 8, para camada i, pelo sistema de equações diferenciais sobre  $U^*$ , o deslocamento é função de  $k_1$ ,  $k_2$ , e da profundidade  $X_3$ , as deduções e sol são realizadas por (NGUYEN, 2002).

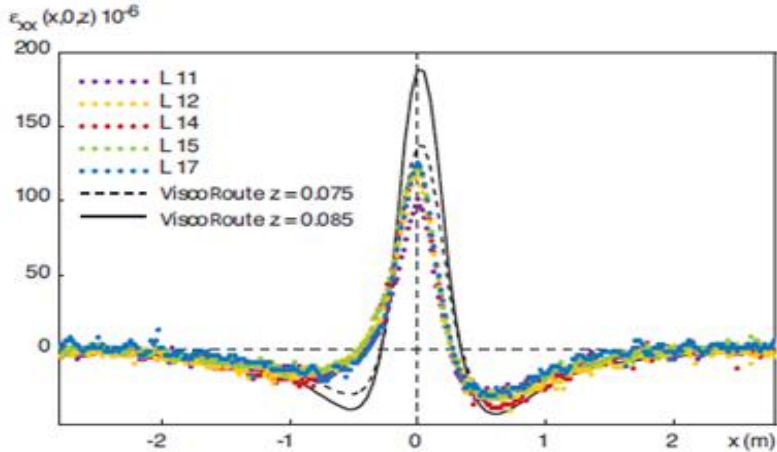
$$A \frac{\partial^2 U^*(k_1, k_2, X_3)}{\partial X_3^2} + iB \frac{\partial U^*(k_1, k_2, X_3)}{\partial X_3} - CU^*(k_1, k_2, X_3) = 0 \quad (8)$$

As ondas de compressão são associadas ao movimento das partículas, que é efetuado paralelamente à direção de propagação da onda e a velocidade  $c_p$ . Esta propagação é devida aos esforços de tração e compressão, induzidos pelo distanciamento e aproximação das faces perpendiculares ao movimento. As ondas de cisalhamento são associadas ao movimento das partículas, que é efetuado perpendicularmente à direção de propagação da onda e a velocidade  $c_s$ , as ondas se propagam mais lentamente sob efeitos de cisalhamento induzidos pelo deslizamento relativo das faces perpendiculares ao movimento (NGUYEN, 2002).

Estudos teóricos e experimentais mostram que a vibração induzida pelo tráfego produz efeitos consideráveis na estrutura do pavimento. A vibração induzida pelo movimento dos veículos tem efeitos significantes sobre o contorno, o solo, as zonas vizinhas e a estabilidade dos veículos, devendo-se conhecer a resposta dinâmica do veículo-estrutura para conseguir prever critérios de falha e dimensionamento (NGUYEN, 2002).

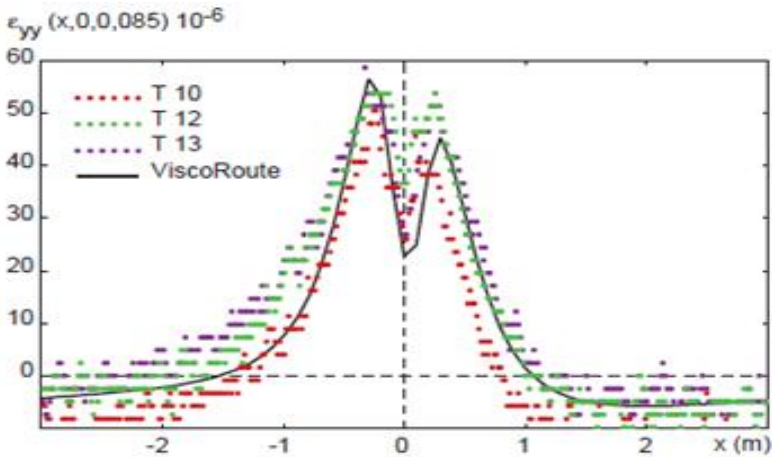
A partir do modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh, que será abordado mais adiante, dos estudos realizados por NGUYEN (2002) e outros pesquisadores do LCPC DUHAMEL, et al., (2005) tem desenvolvido o programa *ViscoRoute*, validado a partir de dados experimentais. Este programa permite modelar a deformação para o sistema de múltiplas camadas, considerando o comportamento viscoelástico do material e a carga em movimento.

Os resultados modelados com o programa *ViscoRoute* são apresentados na Figura 15. Também são representadas as deformações longitudinais ( $\epsilon_{xx}$ ) medidas em campo no LCPC (*Paviment Fatigue Carrousel*) através de extensômetros (*strain gauges L11 a L17*) colocados na base das camadas de concreto asfáltico (DUHAMEL, 2005).



**Figura 15.** Comparação do sinal longitudinal a  $\varepsilon_{xx}$  a uma profundidade de 0.085 m, valores experimentais em pista de teste (L11 a L17) e modelados como o programa *ViscoRoute* (DUHAMEL, 2005). .

Igualmente a deformação transversal modelada com o programa *ViscoRoute* é representada junto com a deformação medida através dos extensômetros (T10 até T13) colocados transversalmente na direção y, são ilustrados na Figura 16 (DUHAMEL, 2005).



**Figura 16.** Comparação do sinal transversal  $\varepsilon_{yy}$  a uma profundidade de 0.085 m, valores experimentais em pista de teste (T0 a T13) e modelados como o programa *ViscoRoute* (DUHAMEL, 2005).

### 3.4 VISCOELASTICIDADE DOS CONCRETOS ASFÁLTICOS

Os concretos asfálticos são caracterizados por apresentarem um comportamento viscoelástico termicamente susceptível, onde suas propriedades dependem tanto da temperatura quanto da velocidade de aplicação da carga.

Existem diversas maneiras de estudar a viscoelasticidade das misturas asfálticas: no domínio viscoelástico linear mediante carregamento quase estático (modo temporal) e mediante carregamento sinusoidal (modo frequencial). No domínio temporal não é simulado a inversão do sinal de deformação que se produz na estrutura do pavimento com a passagem da carga em movimento, o domínio frequencial é mais próximo ao comportamento real destes sob carga em movimento. Na modelação do comportamento o concreto asfáltico é considerado homogêneo, isotrópico, linear no domínio das pequenas deformações e viscoelástico.

**a. Homogeneidade.** As misturas asfálticas resultam da composição de matérias granulares de diferentes frações, onde as partículas são orientadas e distribuídas no corpo da mistura de uma maneira heterogênea a um nível microscópico, porém, a uma maior escala pode ser atribuída certa homogeneidade. (MOMM, 1998; CHANTAL, 1996).

**b. Isotropia.** Os concretos asfálticos são materiais que apresentam certa anisotropia devido às características que podem variar nas diferentes direções, por diversos fatores como o processo de densificação na compactação das camadas.

Para diminuir os efeitos do gradiente de compactação, os corpos-de-prova para os ensaios de módulo complexo e fadiga são extraídos do centro das placas de concreto asfáltico. (MOMM, 1998; De La ROCHE, 1996). No dimensionamento das camadas do concreto asfáltico parte-se da hipótese que o material é isotrópico e homogêneo.

**c. Linearidade.** A linearidade depende do nível da solicitação imposta, no domínio de pequenas deformações onde o comportamento é linear. Neste domínio de linearidade são realizadas as medidas de módulo complexo dos materiais betuminosos (MOMM, 1998; HUET, 1963).

**d. Viscoelasticidade.** Os materiais viscoelásticos são caracterizados por apresentarem um comportamento elástico somado a um comportamento viscoso, o qual é influenciado fortemente pela temperatura e velocidade da aplicação da sollicitação. A viscoelasticidade pode ser interpretada desde a fluência, relaxação e o módulo complexo.

O comportamento viscoelástico é resultado das propriedades dos ligantes betuminosos. Cargas aplicadas rapidamente o material apresenta um comportamento elástico, e na aplicação lenta o comportamento é predominantemente viscoso (PERRET, 2003).

### 3.4.1 Domínio temporal

Os materiais viscoelásticos se caracterizam por apresentar uma resposta em função do tempo, seja função da deformação ou da força, correspondentes à fluência ou relaxação do material.

**a. Fluência.** Ao aplicar um carregamento instantaneamente dá-se uma resposta elástica instantânea e, ao manter a força constante no tempo, produz um escoamento viscoso do material (Figura 17).



**Figura 17.** Fluência a tensão constante (OLARD, 2003).

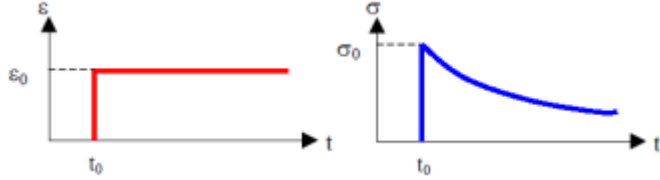
Uma função de fluência a temperatura constante sobre um corpo-de-prova de material viscoelástico linear se impõe a partir de um tempo e tensão constante. Considerando o princípio de superposição de Boltzmann, a deformação  $\varepsilon(t)$  é a soma das respostas a cada uma das sollicitações elementares, podendo ser escrito pela equação 9 (OLARD, 2003).

$$\varepsilon(t) = \sigma(t)J(0) + \int_{t_0}^t \sigma(\tau) \frac{\partial J}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (9)$$

O primeiro termo representa a resposta instantânea e o segundo representa a resposta no tempo (OLARD, 2003).



**b. Relaxação.** Se a deformação do material em relação ao tempo é mantida constante, a relaxação da tensão envolve uma resposta instantânea, observando uma diminuição da tensão em função do tempo (relaxação da tensão) (Figura 18).



**Figura 18.** Relaxação a deformação constante (OLARD, 2003).

A temperatura constante a partir do instante  $t_0$ , com um deslocamento constante (equação 10).

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t - t_0) \quad (10)$$

Para a inclinação da função da deformação imposta:

$$H(t - t_0) = 0 \text{ se } t - t_0 \leq 0$$

$$H(t - t_0) = 1 \text{ se } t - t_0 > 0$$

$\sigma(t) = \varepsilon_0 R(t_0, t)$ , onde a função de relaxação é  $R(t_0, t)$ .

Para uma deformação variável no tempo à temperatura constante, para um material viscoelástico, considerando o princípio de superposição de Boltzmann, a deformação  $\varepsilon(t)$  é a soma das respostas a cada uma das sollicitações elementares, pode ser escrito (equação 11) e (equação 12).

$$\sigma(t) = \int_{t_0}^t R(\tau, t) d\varepsilon(\tau) \quad (11)$$

$$\sigma(t) = \varepsilon(t_0) R(t_0, t) + \int_{t_0}^t R(\tau, t) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (12)$$

$$\sigma(t) = \varepsilon(t_0) R(t - t_0) + \int_{t_0}^t R(t - \tau) \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (13)$$

Integrando por partes, o segundo termo da expressão resulta a equação 14.

$$\sigma(t) = \varepsilon(t) R(0) + \int_{t_0}^t \varepsilon(\tau) \frac{\partial R}{\partial \tau} (\tau - t_0) d\tau \quad (14)$$

O primeiro termo representa a resposta instantânea e o segundo representa a resposta no tempo (OLARD, 2003).

### 3.4.2 Módulo complexo - Domínio frequencial

O ensaio de módulo complexo consiste em submeter o material a solicitações de tipo senoidal para várias frequências e temperaturas. Esta medida é efetuada no domínio das pequenas deformações na qual a mistura se comporta como um material viscoelástico linear (HUET, 1963; De La ROCHE, 1996; MOMM, 1998; PERRET, 2003; BARRA, 2009).

O módulo complexo foi estudado nos concretos asfálticos por HUET (1963), no qual formulou leis de comportamento reológico dos concretos asfálticos. As deduções das equações do módulo complexo fundamentam-se na relação da tensão complexa e deformação no domínio frequencial. Estas são resolvidas com ajuda do cálculo operacional a partir da transformação de Laplace-Carson, onde o problema integro-diferencial da função de relaxação para um sólido viscoelástico é transformado em um sistema de equações algébricas que são análogas às de elasticidade. A solução final resulta da inversão da solução.

O módulo complexo  $E^*$  é um número complexo definido como a relação entre a amplitude complexa da tensão sinusoidal da pulsação  $\omega$ ,  $[f = \frac{\omega}{2\pi}]$ , aplicado a um material  $\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t)$ , e a amplitude complexa da deformação senoidal que resulta em um regime estável.

Devido a características viscoelásticas do material, a deformação acusa um retardo sobre a tensão, traduzido pelo ângulo de defasagem  $\varphi$  entre estas dois sinais  $\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t - \varphi)$  (PERRET, 2003; De La ROCHE, 1996).

Uma das possibilidades para descrever o comportamento viscoelástico linear é determinar experimentalmente o módulo complexo utilizando um sinal de carregamento de senoidal de frequência ( $f$ ) e pulsação  $\omega = 2\pi f$  (OLARD, 2003; HUET, 1963).

Na relaxação da força, se a deformação imposta é variável em função do tempo, e superpondo os efeitos, baseado no princípio de superposição de Boltzmann, da deformação em um tempo  $t=0$ , ou seja,  $\varepsilon(0)$ , e os efeitos crescentes sucessivos da deformação (equação 15).

$$d\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}(\tau) d\tau \quad (15)$$

As equações íntegro-diferenciais, onde os parâmetros dependem do tempo, são extremamente difíceis de utilizar na prática. O cálculo operacional a partir da transformada de Carson-Laplace, para o estudo da viscoelasticidade linear descrito por Mandel (1958) resulta mais simples e aplicável praticamente na teoria de Carson –Laplace (equação 15), permitindo transformar as equações íntegro-diferenciais da viscoelasticidade em equações algébricas da mesma forma que as equações da elasticidade.

$$f^*(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} \cdot f(t) dt \quad (16)$$

Onde:

$f(t)$  = valor a um tempo  $t$ , de uma função  $f$  qualquer;

$p$  = tempo dentro do domínio da transformada de Laplace é uma variável complexa.

$f^*(p)$  = é Imagem da função original  $f$ , isto é,  $f(t) \supset f^*(p)$

É demonstrado que:

$$\frac{d}{dt} \int_0^t g(t-u) f(u) du \supset f^*(p) \cdot g^*(p) \quad (17)$$

Por substituição, fazendo  $u=t-\tau$ , e aplicando a transformada de Laplace-Carson à equação 18 a equação resultante é equação 19 e equação 20.

$$\sigma(t) = \int_0^t R(t-\tau) \cdot \frac{\partial \varepsilon(\tau)}{\partial \tau} d\tau \quad (18)$$

$$\sigma(t) = \frac{d}{dt} \int_0^t \varepsilon(t-u) R(u) \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} \int_0^t \varepsilon(t-u) R(u) \subset \varepsilon^*(p) \cdot R^*(p) \quad (20)$$

As equações resultantes são análogas às equações de elasticidade (NF P 98-260-2) (equação 21).

$$\sigma^*(p) = R^*(p) \cdot \varepsilon^*(p) \quad (21)$$

$R^*(p)$  = é denominado *módulo operacional*

As funções  $R(t)$  (Módulo Relaxação),  $R^*(p)$  (Módulo operacional),  $R^*(i\omega) = E^*(\omega)$  (Módulo complexo) tem papéis equivalentes. A função de relaxação  $R(t)$  tem um significado físico preciso, mas não permite resolver convenientemente problemas práticos de solitação  $R^*(p)$  permite a solução de todos os problemas práticos, mas não tem significado físico evidente (só dentro da relação  $\sigma^*(p)/\varepsilon^*(p)$  da transformação de Carson Laplace da tensão e da deformação, análogas às da teoria de elasticidade). O módulo complexo permite tratar diretamente os problemas de vibrações das forças sinusoidais em regime permanente, e igualmente tem um significado físico, posto que é igual a norma ( $|E^*|$ ) (Tabela 14) (HUET, 1963).

**Tabela 14.** Funções descritas por Cristian Huet (1963).

| Caso elástico | Viscoelástico (domínio temporal)<br>Não representa as solitações reais               | Transformada de Laplace-Carson                      | Módulo Complexo<br>Simula a solitação real  |
|---------------|--|---|---|
| E, constante  | $R(t)$ , Função do tempo, resposta da tensão a uma deformação constante para $t > 0$ | $R^*(p)$ , Função da variável $p$ complexa qualquer | $R^*(i\omega) = E(\omega)$<br>Função da pulsação $\omega$ do movimento sinusoidal |

As equações da 22 a 26, faz parte das deduções realizadas por De La ROCHE, 1996. Substituindo na equação 21 a equação tensão e deformação sinusoidal complexa levam à equação 22.

$$\sigma_o \cdot \sin(\omega p) = R^*(p) \cdot \varepsilon_o \cdot \sin(\omega p - \varphi) \quad (22)$$

$$\sin(u \pm v) = \sin(u) \cdot \cos(v) \pm \cos(u) \cdot \sin(v) \quad (23)$$

$$\sigma_o \cdot \sin(\omega p) = R^*(p) \cdot \varepsilon_o \cdot [\sin(\omega p) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\omega p) \cdot \sin(\varphi)] \quad (24)$$

$$\sigma_o \cdot \left( \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} \right) = R^*(p) \cdot \varepsilon_o \cdot \left[ \left( \frac{p\omega}{p^2 + \omega^2} \right) \cdot \cos(\varphi) - \left( \frac{p^2}{p^2 + \omega^2} \right) \cdot \sin(\varphi) \right] \quad (25)$$

$$\sigma_o = R^*(p) \cdot \varepsilon_o (\cos(\varphi) - \frac{p}{\omega} \sin(\varphi)) \quad (26)$$

Com a inversão desta solução se obtém o módulo complexo para o material viscoelástico. É demonstrado que, dentro das vibrações das forças no regime sinusoidal permanente, esta inversão é imediata. Se  $\omega$  é a pulsação do movimento sinusoidal, a função original é obtida fazendo  $p=i\omega$  dentro do módulo operacional da solução, a qual expressa dentro

a representação complexa dos movimentos sinusoidais (NF P 98-260-2) (equação 27) e (equação 28).

$$\sigma_o = R^*(i\omega) \cdot \varepsilon_o (\cos(\varphi) - i \sin(\varphi)) \quad (27)$$

$$E^*(\omega) = R^*(i\omega) = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o e^{-i\varphi}} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot e^{i\varphi} \quad (28)$$

Estas equações também podem ser escritas da forma. Equações 29 a 34

$$\sigma^*(t) = R^*(i\omega) \cdot \varepsilon^*(t) \quad (29)$$

$$R^*(i\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)} = E^*(\omega) \quad (30)$$

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_o e^{i\omega t}}{\varepsilon_o e^{i(\omega t - \varphi)}} \quad (31)$$

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_o e^{i\omega t}}{\varepsilon_o e^{i\omega t} \cdot e^{-i\varphi}} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o e^{-i\varphi}} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot e^{i\varphi} \quad (32)$$

$$|E^*| = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad (33)$$

$$E^* = |E^*| e^{i\varphi} \quad (34)$$

Onde:

$E^*$  = módulo complexo ou soma vetorial das componentes elásticas e viscosas (real e imaginária);

$|E^*|$  = módulo de rigidez ou norma do módulo complexo, isto é, a relação das amplitudes da tensão e da deformação;

$\sigma^*$  e  $\varepsilon^*$  = valores complexos da tensão e da deformação no tempo t;

$\sigma$  e  $\varepsilon$  = valores das amplitudes da tensão e da deformação, no tempo t;

$\omega$  = pulsação do sinal e f é a frequência da solicitação; e,

$\varphi$  = ângulo de fase ou de retardo (defasagem) da deformação em relação à tensão aplicada, também chamado ângulo de perda e é função do atrito interno da matéria;

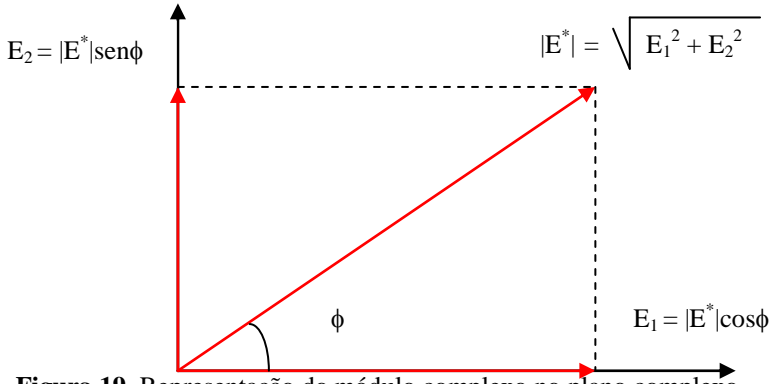
$i = \sqrt{-1}$ , representa o eixo imaginário da variável complexa.

O ângulo de fase é uma propriedade dos materiais viscoelásticos, quando a diferencia de fase entre a tensão e a deformação é u igual a 0

trata se de um material puramente elástico. Quanto maior o ângulo de fase mais viscoso é o material.

$\varphi = 0^\circ$  para materiais puramente elásticos;  
 $\varphi = 90^\circ$  para materiais puramente viscosos.

Na Figura 19, são ilustradas as componentes do módulo complexo.



**Figura 19.** Representação do módulo complexo no plano complexo.

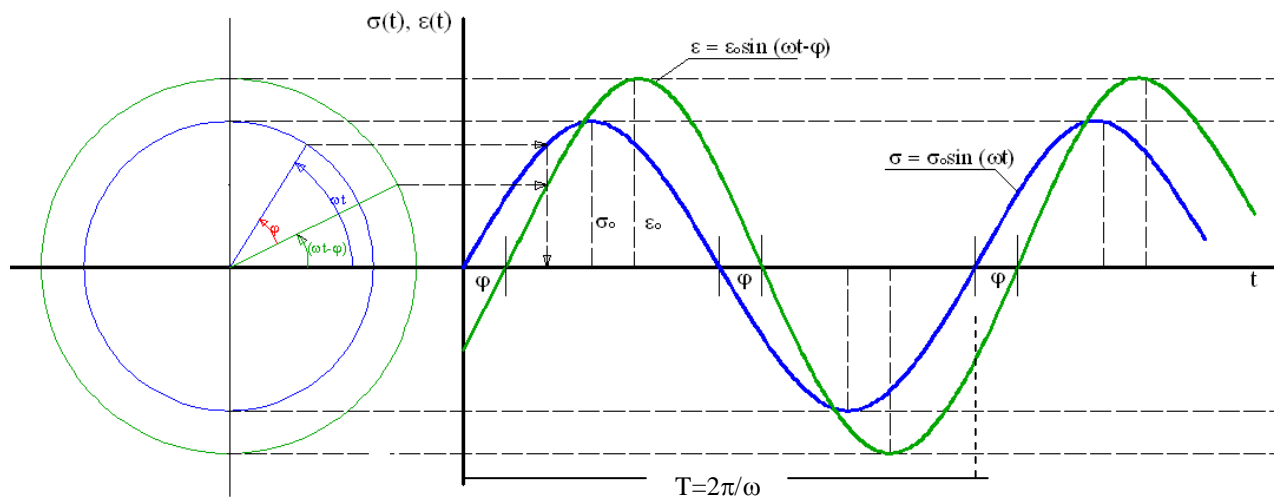
$$E^* = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot e^{i\varphi} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot [\cos\varphi + i\sin\varphi] = E_1 + iE_2 = |E^*|e^{i\varphi} \quad (35)$$

Onde:

$E_1$  é a parte real, que representa a energia armazenada no material que pode ser recuperada;

$E_2$  é a parte imaginária, que representa a energia perdida por atrito interno do material (comportamento viscoso irreversível).

Na Figura 20, é ilustrado o princípio do ensaio do módulo complexo mediante solicitações sinusoidais.



**Figura 20.** Módulo complexo mediante flexão alternada no domínio, funções defasadas.

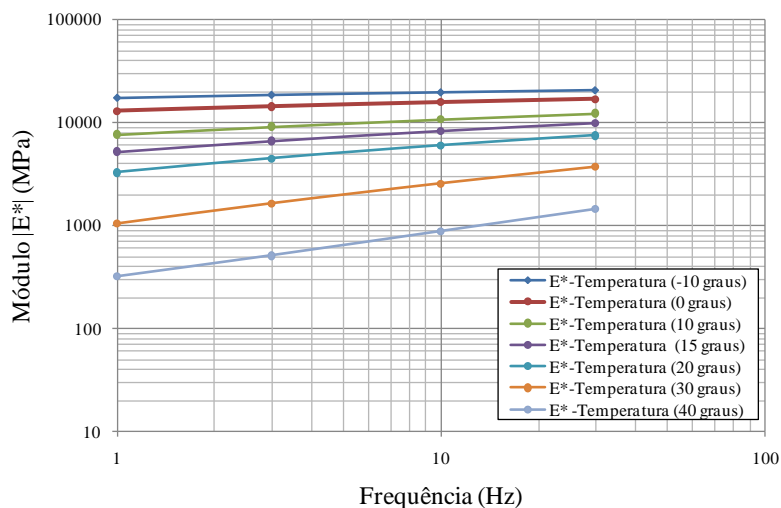
$\varphi$ : ângulo de fase ou diferença de fases das funções.

### 3.5 REPRESENTAÇÃO E INTERPRETAÇÃO DO MÓDULO COMPLEXO

As componentes do módulo complexo variam em função da temperatura e da frequência com que é aplicada a sollicitação. Variam em cada ensaio de  $-10^{\circ}\text{C}$  até  $40^{\circ}\text{C}$  e de 1Hz até 40Hz, e os resultados experimentais são usualmente expressados com a ajuda de representações clássicas (BAAJ, 2002).

#### 3.5.1 Curvas isotermas

É a representação da norma do módulo complexo  $|E^*|$  em função da frequência para cada temperatura do ensaio, em coordenadas bilogarítmicas (BAAJ, 2002). A Figura 21 apresenta um exemplo desta interpretação.



**Figura 21.** Representação do módulo em curvas isotérmicas (MOMM, 1998).

A inclinação da isotérmica possibilita estimar a susceptibilidade cinética a uma dada temperatura, isto é, à variação do módulo com a duração da sollicitação (BAAJ, 2002).



### 3.5.2 Curvas equivalência Frequência Temperatura

É a representação dada pela transladação de cada curva isotérmica para uma de referencia. Estas curvas podem ser representadas por uma curva única, denominada curva equivalência frequência temperatura.

Esta transladação pode ser realizada por diferentes métodos, mediante as equações de ARRHENIUS, WILLIAN-LANDEL e FERRY ou por transladação gráfica.

A translação pela equação de ARRHENIUS deve-se determinar o coeficiente de translação  $\log(a_T)$  (equação 36).

$$\log(a_T) = \frac{\delta H}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right) \quad (36)$$

Onde:

C1 e C2= constantes dependentes do material;

$\delta H$  = energia aparente de ativação característica do material;

R = constante dos gases;

T = temperatura;

$T_R$  = temperatura de referencia em °K.

A translação pela equação de WILLIAN-LANDEL e FERRY deve-se determinar o coeficiente de translação  $\log(a_T)$  (equação 37).

$$\log(a_T) = \frac{-C_1(T-T_R)}{(T-T_R)+C_2} \quad (37)$$

Onde:

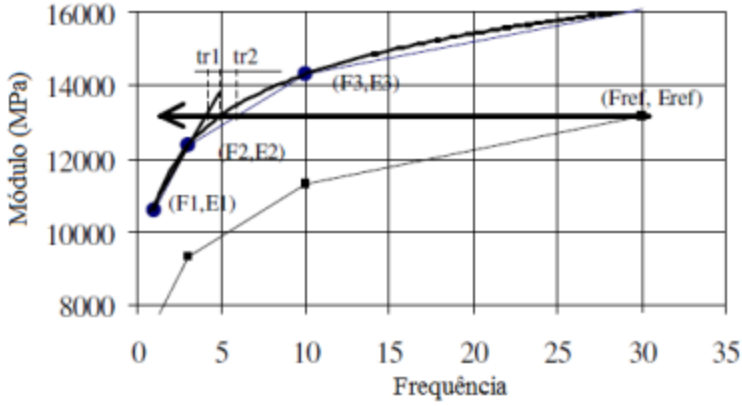
C1 e C2= constantes dependentes do material;

T = temperatura;

$T_R$  = temperatura de referencia em °K.

Outra forma de realizar a translação das curvas isotérmicas é através do método gráfico, onde escolhe-se um ponto de referência ( $F_{ref}$ ,  $E_{ref}$ ).

É escolhida na outra três pontos (  $F_1, E_1$ ;  $F_2, E_2$  et  $F_3, E_3$ ), sendo o valor do módulo do ponto de referência próximo do valor do módulo no ponto ( $F_2, E_2$ ). São obtidos dois pontos no qual o valor de módulo é igual ao valor do módulo de referência. Utilizando a frequência média dos pontos para a translação (Figura 22).



**Figura 22.** Translação Gráfica das Curvas Isotérmicas (MOMM, 1998).

$$tr_1 = \exp \left[ \ln(F1) + \frac{\ln\left(\frac{F2}{F1}\right)}{\ln\left(\frac{E2}{E1}\right)} \times \ln\left(\frac{E_{ref}}{E1}\right) \right] \quad (38)$$

$$tr_2 = \exp \left[ \ln(F2) + \frac{\ln\left(\frac{F3}{F2}\right)}{\ln\left(\frac{E3}{E2}\right)} \times \ln\left(\frac{E_{ref}}{E2}\right) \right] \quad (39)$$

$$tr_m = \frac{(tr_1 + tr_2)}{2} \quad (40)$$

$$\ln(\alpha_T) = \ln\left(\frac{F_{ref}}{tr_m}\right) \quad (41)$$

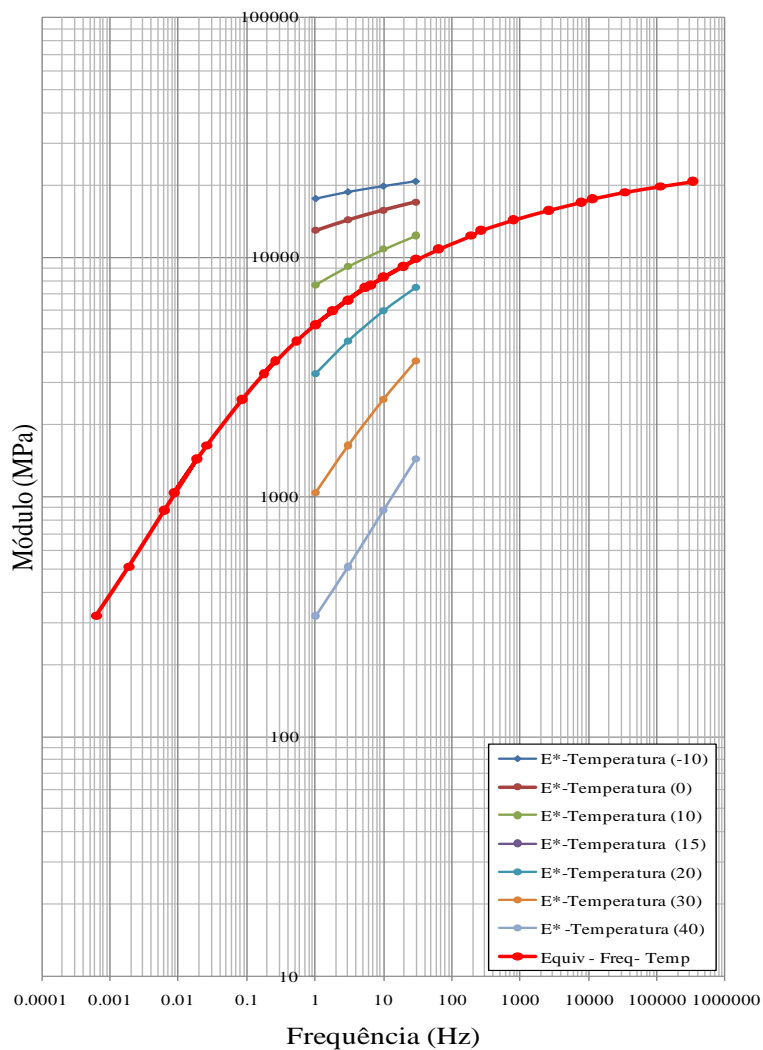
Onde:

$tr_1$  ,  $tr_2$  = translações;

$(F_i, E_i)$  = pontos (frequência, módulo);

$\alpha_T$  = fator de translação.

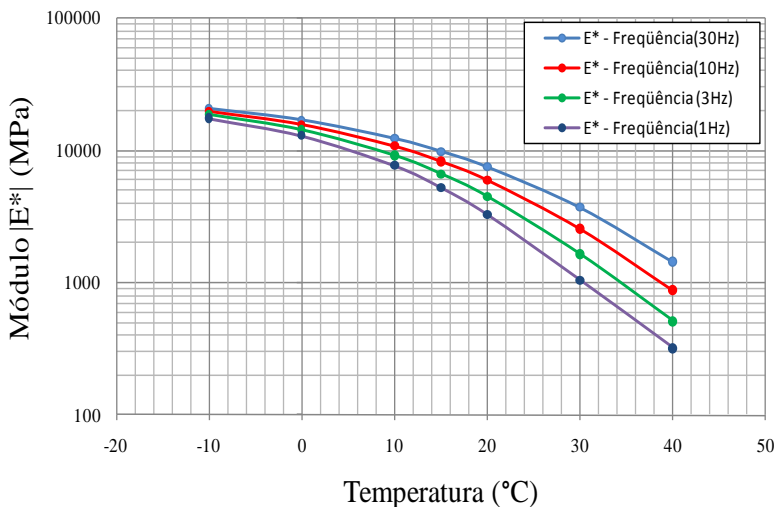
O significado desta curva pode ser interpretado pela sua inclinação. Uma curva horizontal representa um material puramente elástico, e uma curva vertical mostra a susceptibilidade do material à frequência e temperatura (Figura 23).



**Figura 23.** Curvas Equivalência - Frequência – Temperatura (MOMM, 1998).

### 3.5.3 Curvas isócronas

O módulo complexo pode ser representado para cada nível de frequência em função da temperatura em escala logarítmica. As curvas isócronas permitem visualizar a susceptibilidade térmica dos concretos asfálticos em função da temperatura fixa (Figura 24).



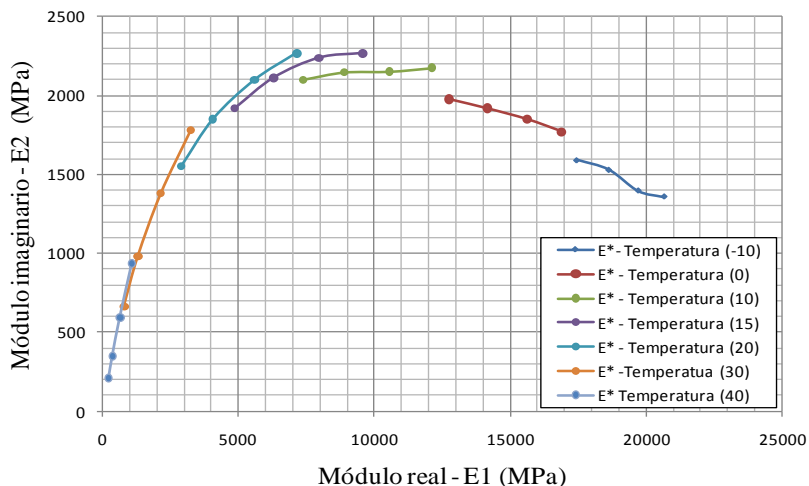
**Figura 24.** Representação do módulo complexo em curvas isócronas (MOMM, 1998).

### 3.5.4 Curvas no plano Cole-Cole

Consiste em representar a parte real  $E_1$  do módulo nas abscissas e a parte imaginária  $E_2$  nas ordenadas. A propriedade de equivalência-temperatura aparece diretamente dentro deste plano.

Esta curva é característica do material estudado por HUET, (1963), e mostra que esta representação é uma curva única similar com um semi-arco, sendo utilizada para entender o comportamento reológico da mistura (BAAJ, 2002).

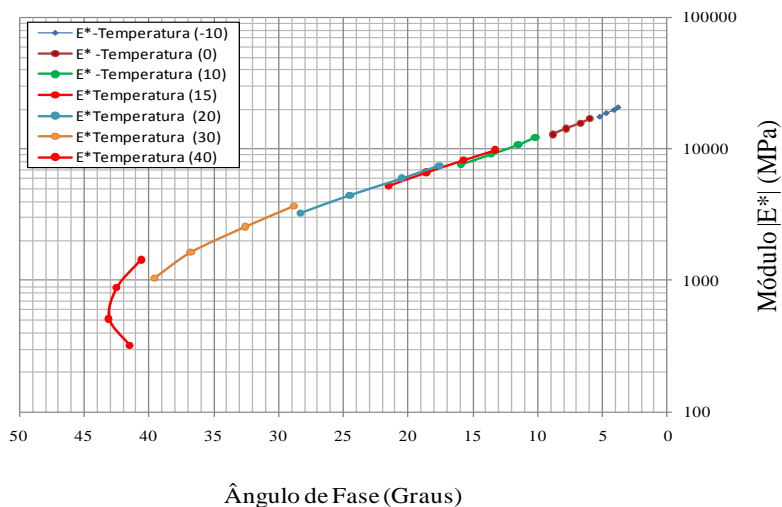
O ponto máximo da parte imaginária fornece uma indicação da temperatura crítica para a fadiga da mistura asfáltica (TIVHES, 2009), um exemplo desta representação é ilustrado na Figura 25.



**Figura 25.** Módulo complexo no plano COLE-COLE (MOMM, 1998).

### 3.5.5 Curvas no espaço Black

Nesta representação permite-se observar a evolução do ângulo de fase e do módulo complexo, e nesta curva pode-se visualizar um único valor de módulo para cada ângulo de fase (Figura 26).



**Figura 26.** Módulo complexo representado no espaço Black (MOMM, 1998).

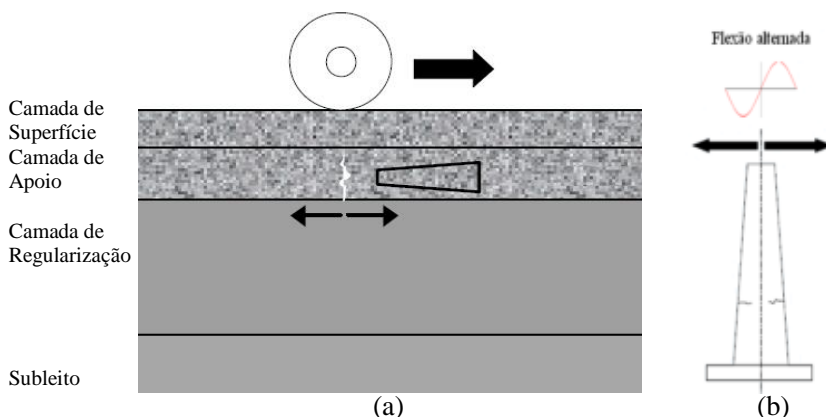
### 3.6 FADIGA DOS CONCRETOS ASFALTICOS

O fenômeno de fadiga corresponde à deterioração progressiva até a ruptura do material submetido a solicitações repetidas de amplitude inferior à solicitação limite de ruptura. A acumulação de ciclos de solicitação leva a ruptura por fadiga, e os seus primeiros estudos foram conduzidos por Wohler em 1852 sobre metais. Este fenômeno pode ser observado em numerosos tipos de materiais e estruturas (DOMECC, 2005).

A ruptura é dada pela fissuração o que é um fenômeno de degradação que se apresenta por fissuras na parte inferior das camadas de base. Quando o nível de fissuração é importante, essas fissuras se propagam à superfície (RIVIERE, 1996).

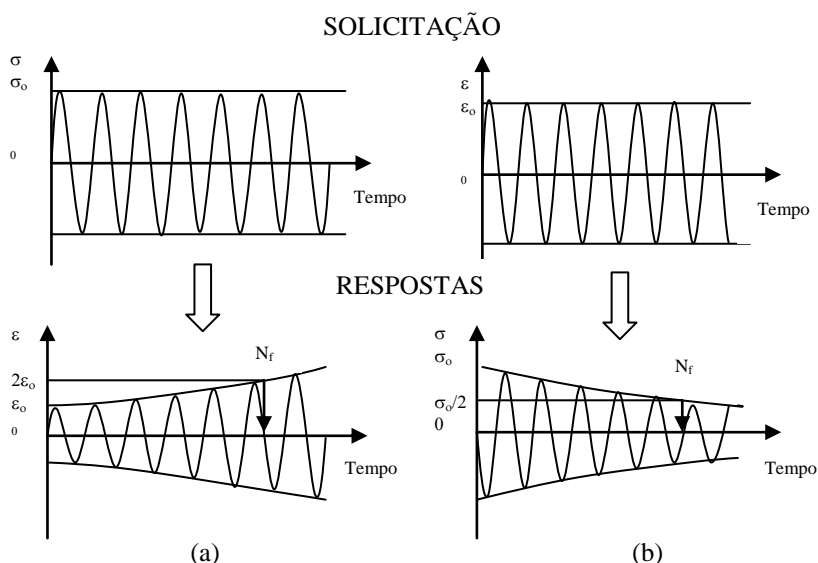
Este comportamento se traduz pela flexão alternada das camadas do pavimento. A solicitação pode ser de compressão ou tração, segundo a profundidade e posição do eixo neutro onde a parte acima do eixo trabalha à compressão e à inferior à tração. Estes efeitos podem ser simulados no ensaio de laboratório de fadiga mediante deformação ou tensão controlada, a partir de corpos-de-prova trapezoidais.

Na Figura 27-a, é ilustrado a situação geral de comportamento, se as camadas de concreto asfáltico são perfeitamente coladas o sinal de distensão de maior grandeza ocorrerá na fibra inferior da camada de maior profundidade; na Figura 27-b, é ilustrado o princípio do ensaio do ensaio mediante flexão alternada que simula a alternância do sinal mediante deslocamento controlado.



**Figura 27.** (a) modelo de comportamento dos pavimentos asfálticos contexto geral (b) simulação em laboratório (DOMECC, 2009).

Os dois modos principais de ensaios são: a) A deslocamento controlado, onde o sinal de solicitação aplicado ao corpo de prova é um sinal de deslocamento com amplitude e frequência constante. A força necessária para criar o deslocamento evoluciona durante o ensaio. b) A força controlada a amplitude da força e a frequência do sinal permanecem constantes, sendo que para este ensaio é a deformação que varia durante o ensaio (BAAJ, 2002). Estas duas situações são ilustradas na Figura 28.



**Figura 28.** Sinais de solicitação e resposta nos dois modos do ensaio, (a) tensão controlada (b) deformação controlada (BAAJ, 2002).

A fadiga é um fenômeno físico que pode ser representado pela equação de Wöhler. Esta curva é dada pela equação 42. E determina a vida em fadiga de um material em função das solicitações ( $S$ ) aplicadas.

$$N = aS^b \quad (42)$$

Onde:

- $N$  = Número de aplicação da solicitação;
- $S$  = Solicitação (tensão ou deformação);
- $b$  = inclinação da curva;
- $a$  = constante.

A inclinação  $b$  e a constante  $a$ , são obtidas por regressão para os dados experimentais do ensaio de fadiga realizado mediante solicitação senoidal. Para uma solicitação senoidal  $S^*$  representada pela equação 43, sua resposta associada  $R^*$  sobre um material viscoelástico é dada pela equação 44:

$$S^* = S_m \cdot e^{i\omega t} \quad (43)$$

$$R^* = R_m \cdot e^{(i\omega t - \varphi)} \quad (44)$$

Onde:

$S^*$  = solicitação senoidal;

$R^*$  = resposta senoidal;

$S_m$  e  $R_m$  = amplitudes da solicitação e da resposta;

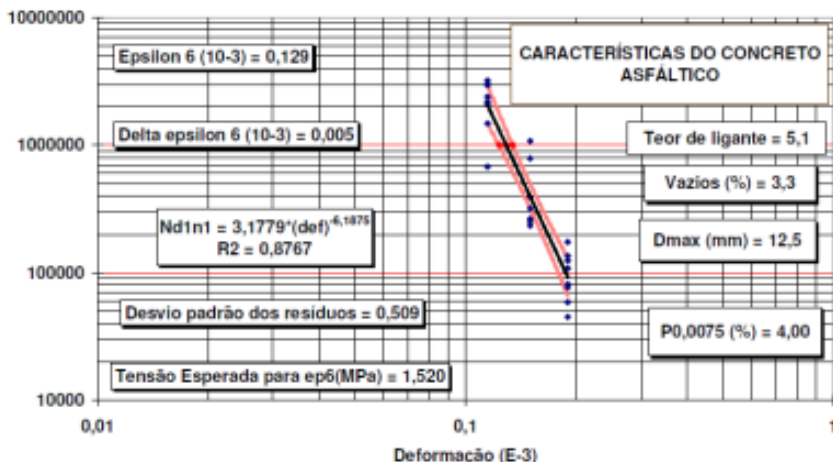
$\omega$  = pulsação;

$\varphi$  = defasagem entre a solicitação e a resposta.

Na Figura 29, é ilustrada a curva de fadiga característica para uma mistura asfáltica formulada com CAP20, também são representadas as duas hipérboles (superior e inferior) para um grau de confiança de 95%. Os pontos experimentais são obtidos mediante solicitação senoidal a deformação controlada e modo contínuo em corpos de prova trapezoidais. A curva é construída a partir dos resultados para três níveis de deformação impostos, sendo que em cada nível são ensaiados determinados número de corpos-de-prova.

A partir desta determina-se parâmetros que são utilizados para o cálculo da lei de fadiga e deformação admissível do material em função de determinado número de ciclos. O parâmetro  $\epsilon_6$  ( $\epsilon_6$ ), corresponde à deformação para um milhão de ciclos, o parâmetro  $b$  corresponde à inclinação da curva de fadiga,  $\Delta\epsilon_6$  ( $\Delta\epsilon_6$ ), corresponde à variação de ( $\epsilon_6$ ) para mais ou para menos, SN corresponde ao desvio padrão dos resíduos determinado estatisticamente.



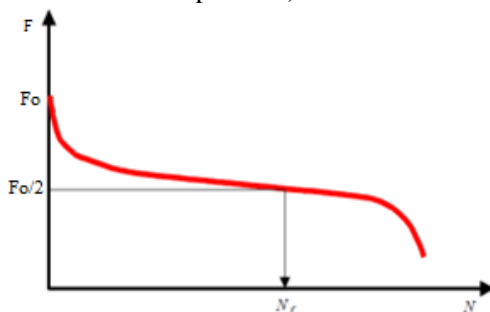


**Figura 29.** Ensaio de fadiga a deformação controlada em modo contínuo (MOMM, 1998).

### 3.6.1 Mecanismo de fadiga

Para os dois modos de solicitação as características do material evoluem em função do tempo. O módulo de rigidez do corpo de prova diminui devido aos danos em fadiga. O ângulo de fase aumenta com a evolução da viscosidade do material e, igualmente, a energia dissipada por ciclo de carregamento aumenta.

Na Figura 30, é ilustrado o critério de ruptura a deformação controlada. O corpo-de-prova é considerado em ruptura quando a força atende a metade de seu valor inicial medido no primeiro ciclo de carregamento dentro das mesmas condições do ensaio (mesma frequência e mesma temperatura).



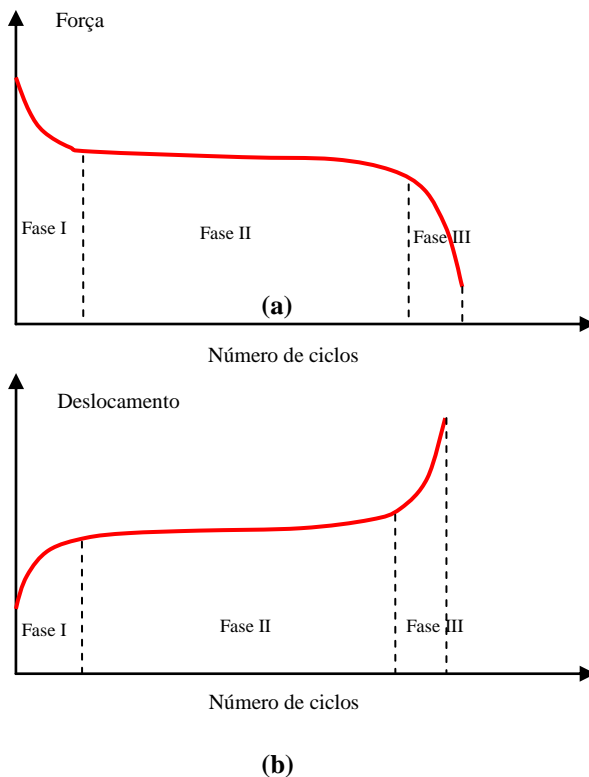
**Figura 30.** Definição do número de ciclos de ruptura.

$N_f$  = Número de ciclos  $N_f$  para quando a força é igual à metade da força inicial;

$F_0$  = Força no primeiro ciclo de carregamento.

No ensaio de fadiga distinguem-se três fases dentro da evolução do módulo em função do tempo ou do número de ciclos (Figura 31).

- Fase I, ou fase de aquecimento, observa-se uma caída rápida do módulo;
- Fase II, ou fase de fadiga, apresenta uma leve inclinação traduzida pela estabilização quase linear e uma evolução lenta do dano;
- Fase III ou fase de ruptura: decrescimento acelerado do módulo e uma concentração forte de tensão.



**Figura 31.** Distinção entre as três fases no ensaio de fadiga (a) deslocamento controlado (b) tensão controlada.

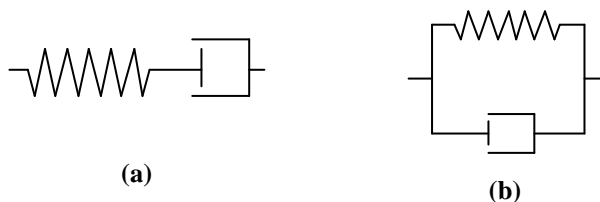
### 3.7 MODELOS REOLÓGICOS DE COMPORTAMENTO VISCOELÁSTICO

Esta parte está dedicada à apresentação dos modelos reológicos básicos para a modelação dos materiais viscoelásticos e apresentação do modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh.

#### 3.7.1 Modelo de Maxwell e Kelvin Voigt

O comportamento de numerosos materiais viscoelásticos pode ser descrito com ajuda de modelos reológicos simples fundados na associação de elementos analógicos parecidos a molas e amortecedores lineares ou parabólicos (MILLARD, 2005). A combinação de molas (elementos estáticos) e amortecedores lineares (elementos viscosos Newtonianos) constitui um modelo viscoelástico analógico (PERRET, 2003; OLARD, 2003). Numerosos modelos combinando molas e amortecedores lineares têm sido desenvolvidos para descrever o comportamento viscoelástico de diversos materiais. (OLARD, 2003, MILLARD, 2005).

A associação destes elementos, em paralelo ou em série, correspondem aos modelos de Maxwell e Kelvin-Voigt. Os modelos analógicos de Maxwell (líquido viscoelástico) e Kelvin Voigt (sólido viscoelástico) não descrevem corretamente o comportamento complexo dos materiais betuminosos, mais podem constituir os elementos de base para associações mais complexas (OLARD, 2003) (Figura 32).



**Figura 32.** Modelo de Maxwell e Kelvin Voigt no domínio temporal (MILLARD, 2005).

Para materiais viscoelásticos, onde as respostas são mais complexas, é necessário um número importante de elementos (modelos generalizados) que descrevam o comportamento do material. Estes modelos são formulados a partir das funções de fluência e relaxação, respectivamente, no domínio temporal, que a sua vez podem ser levadas

a um domínio frequencial com a substituição e solução das equações correspondentes.

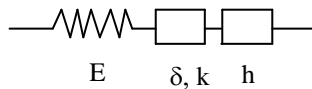
Uma maneira de representar o comportamento dos materiais betuminosos através dos modelos de Maxwell e Kelvin seria por meio de modelos generalizados, precisando um maior número de elementos analógicos (molas, amortecedores). O modelo generalizado de Maxwell é constituído de um grupo de  $n$  elementos de Maxwell colocados em paralelo com eventualmente, uma mola e um amortecedor linear em paralelo. O modelo de Kelvin-Voigt generalizado é constituído de certo número de elementos em série e, eventualmente, uma mola e um amortecedor linear em série.

Os modelos generalizados de Maxwell e Kelvin-Voigt permitem uma descrição satisfatória do comportamento dos ligantes e misturas betuminosas como condição de um número de elementos  $n$  existentes consideráveis ( $n = 8$  no mínimo). (LEE, 1996; LUNDSTRÖM, 2002; OLARD, 2003; MILLARD 2005).

### 3.7.2 Modelo de Huet

O comportamento frequencial das misturas betuminosas e ligantes pode ser descrito por um modelo de fluagem biparábólico, associado a uma mola em série. Este modelo analógico constitui a união de uma mola de rigidez  $E_{\infty}$ , que representa o módulo instantâneo e dois elementos de fluagem parábólico  $J_1(t)=at^h$  e  $J_2(t)=bt^k$  colocados em série. A representação analógica deste modelo pode ser observada na (Figura 33) e a expressão do módulo complexo representada pela (equação 45) (HUET, 1963).

O modelo de Huet é um modelo analógico que tem uma função de fluência e permite o cálculo do comportamento temporal do corpo de prova (MILLARD, 2005; OLARD 2003).



**Figura 33.** Representação analógica do modelo de (HUET, 1963).

$$E^*(i\omega\tau(\theta)) = \frac{E_{\infty}}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (45)$$

Onde:

- i = número complexo definido por  $\sqrt{-1}$ ;
- $\omega = 2\pi f$ , f é a frequência da pulsação;
- h = expoente tal que  $0 < h < 1$ ;
- a = constante dentro da dimensão;
- $\tau$  = tempo de retardo característico no qual seu valor varia somente com a temperatura.

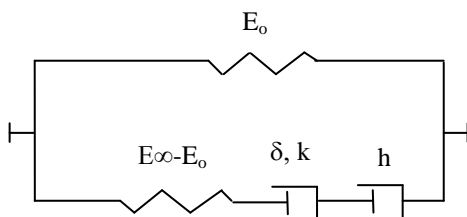
$\tau(\theta) = e^{A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2 + A_3\theta^3}$ , é uma aproximação segundo a susceptibilidade térmica do material.

Um elemento parabólico é um modelo analógico que tem uma função de fluência do tipo parabólico. Este modelo analógico é um espectro contínuo posto que sua representação pelo modelo de Maxwell ou Kelvin resultaria em um número infinito de elementos (OLARD, 2003).

Este modelo permite descrever corretamente o comportamento das misturas betuminosas, porém a presença de um amortecedor parabólico com uma mola em série não permite descrever o comportamento para altas temperaturas e baixas frequências (MILLARD, 2005).

### 3.7.3 Modelo de Huet-Sayegh

Este modelo difere do modelo de Huet para o domínio de baixas frequências e altas temperaturas. No modelo de Huet o comportamento fluido das misturas asfálticas dentro do domínio das baixas frequências e altas temperaturas, em particular a norma do módulo complexo tende a zero (OLARD, 2003). Para o mesmo domínio de frequências e temperaturas, Sayegh em 1965 obtêm uma curva, onde o valor do módulo complexo é não nulo, chamado módulo estático  $E_0$ , sendo muito menor que  $E_\infty$ . A Figura 34 representa o modelo analógico do modelo de Huet-Sayegh.



**Figura 34.** Modelo reológico de Huet-Sayegh.

O módulo complexo determinado a partir do modelo de Huet-Sayegh é dado pela equação 46.

$$E^*(i\omega\tau(\theta)) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (46)$$

$$\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)} \quad (47)$$

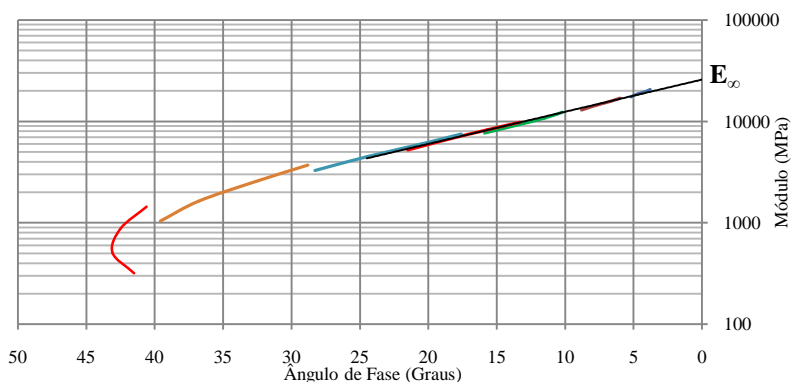
Onde:

- $E_\infty$  = módulo instantâneo para quando  $\omega\tau$  tende ao  $\infty$ , é obtido para as elevadas frequências e baixas temperaturas;
- $E_0$  = módulo estático, obtido para a condição de baixas frequências e elevadas temperaturas;
- $k, h$  = expoentes dos elementos parabólicos do modelo;
- $\delta$  = função da natureza do ligante e composição granulométrica;
- $\tau$  = tempo de relaxação dos amortecedores, parâmetro em função do tempo, que varia com a temperatura;
- $\omega$  =  $2\pi f$ , pulsação;
- $f$  = frequência de solitação.

O modelo é representado por dois amortecedores e duas molas, sua definição é dada por cinco constantes viscoelásticas em relação com as molas e os amortecedores ( $E_\infty$ ,  $E_0$ ,  $k$ ,  $h$ ,  $\delta$ ).  $E_0$ , representa o módulo estático para quando o material é solicitado nas baixas frequências e elevada temperatura;  $E_\infty$ , representa o módulo elástico do material para quando o material é solicitado a elevada frequência e baixa temperatura;  $(E_\infty - E_0)$ , representa a resposta elástica instantânea retardada.

Os parâmetros  $k$ ,  $h$  representam os coeficientes parabólicos do modelo; e o parâmetro  $\delta$ , determina a altura do modelo. As constantes térmicas permitem a determinação do parâmetro  $\tau$ , o qual é definido por três constantes ( $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$ ), segundo equação 47.

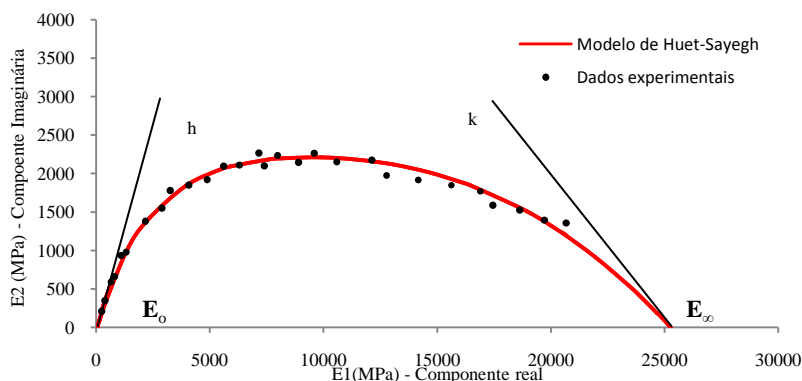
Os parâmetros do modelo podem ser determinados manualmente através dos dados experimentais do módulo complexo no plano Cole-Cole e espaço Black.  $E_\infty$ , define-se por extrapolação no espaço Black ilustrado na figura 35.



**Figura 35.** Determinação do módulo infinito no espaço Black.

$E_0$ , determina-se por extrapolação no plano Cole-Cole para situação de elevada temperatura e baixa frequência. Os expoentes  $k$  e  $h$  do modelo determinam-se a partir da tangente com a intersecção dos extremos com  $E_0$  e  $E_\infty$  e regulam a curvatura do modelo nesses pontos. O parâmetro  $\tau$  é função da temperatura e  $\delta$  que rege a altura do modelo são determinados por aproximação matemática através de mínimos quadrados. Todos os parâmetros do modelo podem ser calibrados também através do programa Viscoanalyse desenvolvido pelo *Laboratoire Central de Ponts et Chaussées* (LCPC) para este propósito.

O modelo de Huet-Sayegh é representado na Figura 36, junto com os dados experimentais.



**Figura 36.** Modelo de Huet-Sayegh no plano Cole-Cole.

### 3.8 FATORES QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO DAS MISTURAS

O comportamento dos concretos asfálticos é fortemente influenciado pela composição volumétrica, pelas características dos componentes (granulares, natureza do filer, e do tipo de ligante), pelo tipo e intensidade das ações aplicadas.

#### 3.8.1 Influência do tipo de ligante

O asfalto é um material betuminoso, constituído principalmente por asfaltenos, resinas e óleos, elementos que proporcionam características de consistência, aglutinação e ductibilidade. Os ligantes asfálticos podem ser classificados, pela consistência, desde ligantes moles até ligantes de maior consistência e podem ser dos seguintes tipos:

10/20 ligante de consistência muito elevada;

20/30 ligante de elevada consistência;

35/50 ligante de consistência média;

80/100 ligante de baixa consistência.

Os concretos asfálticos produzidos com ligantes de elevada consistência são menos suscetíveis às variações de temperatura e frequência e, por conseguinte, terão uma vida maior. No entanto, não se trata uma simples substituição do ligante, devendo-se ter cuidado na dosagem e no teor de cimento necessário para garantir a resistência à fadiga.

O comportamento mecânico dos concretos asfálticos é dependente da consistência do ligante, e o efeito termo mecânico pode ser evidenciado através de ensaios reológicos tanto dos ligantes asfálticos quanto das misturas asfálticas. Na Tabela 15 são descritas as características dos ligantes asfálticos estudados por OLARD (2003).

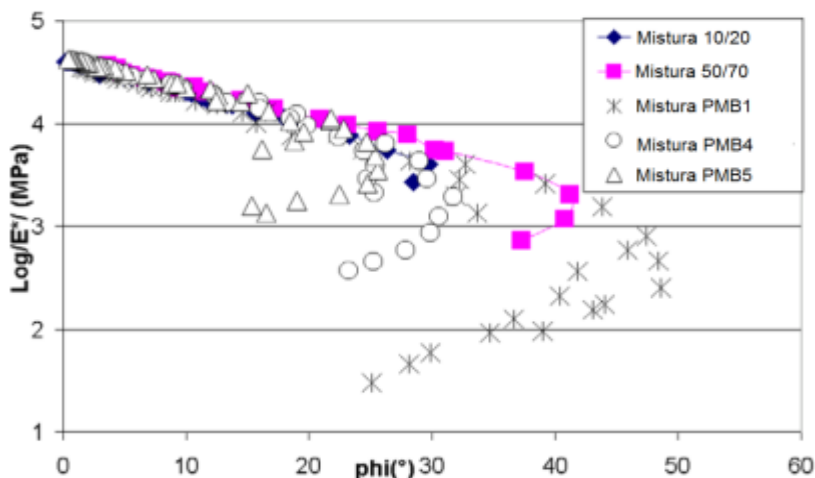
**Tabela 15.** Características dos ligantes utilizados por (OLARD, 2003).

| Ligante           | 10/20 | 50/70 | PMB1  | PMB4  | PMB5  |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| %polímero         |       |       | Baixo | Forte | Forte |
| Pen 25C (mm/10)   | 18    | 60    | 24    | 88    | 54    |
| Temp Amolecimento | 62    | 48.5  | 68    | 100   | 65.8  |

\*PMB correspondem a ligantes modificados com polímeros.

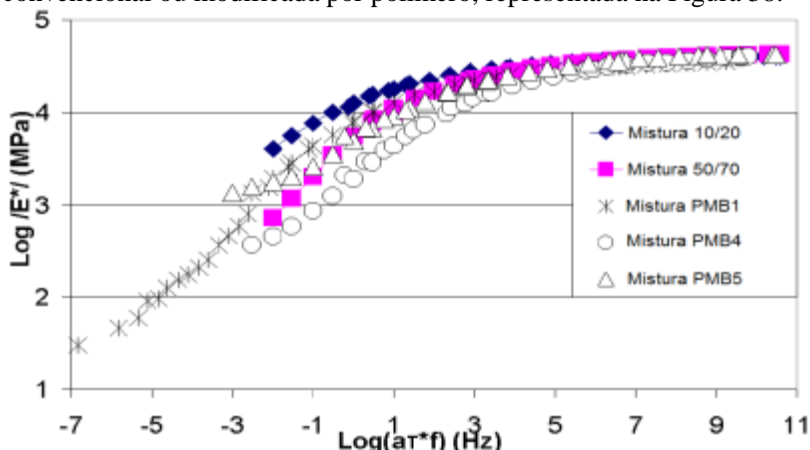


A representação no espaço Black permite verificar a menor variação do ângulo de fase para a mistura com ligante CAP10/20 em relação à mistura com ligante convencional e menor susceptibilidade térmica desta mistura, esta representação é ilustrada na Figura 37.



**Figura 37.** Representação no espaço Black (OLARD, 2003).

Ao comparar as misturas asfálticas estudadas por OLARD (2003) através da curva equivalência frequência-temperatura, pode-se observar menor variação no módulo complexo em função da frequência para as misturas dosadas com ligante CAP10/20 em comparação da mistura convencional ou modificada por polímero, representada na Figura 38.



**Figura 38.** Equivalência frequência – temperatura (OLARD, 2003).

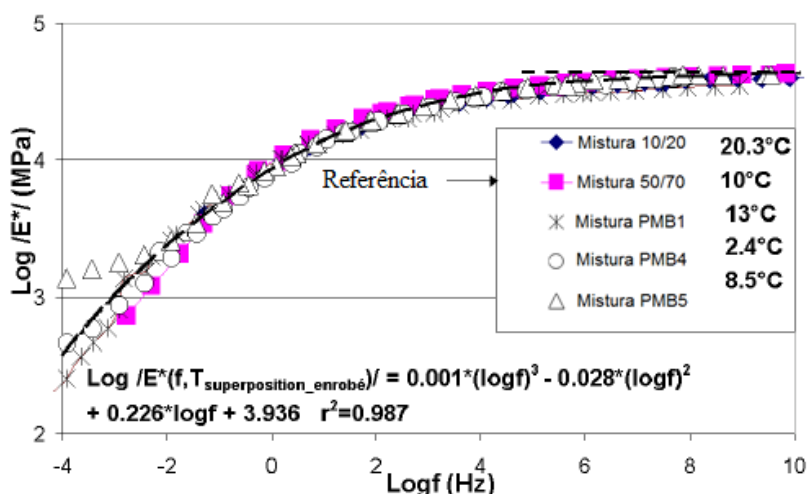
É possível sobrepor a curvas equivalência frequência temperatura das misturas. A Figura 39, ilustra a superposição das misturas sobre a curva matriz de referencia da mistura com ligante 50/70 que considera a temperatura de translação  $T_s = 10^\circ\text{C}$ , as temperaturas das outras misturas são indicadas na Tabela 16.

**Tabela 16.** Temperaturas de superposição das misturas a mistura de referência (OLARD, 2003).

| Ligante                                       | 10/20 | 50/70<br>Referência | PMB1 | PMB4 | PMB5 |
|---|-------|---------------------|------|------|------|
| Tsuperposição<br>ligante ( $^\circ\text{C}$ ) | 22,3  | 10                  | 11,3 | -0,6 | 8,5  |
| Tsuperposição<br>mistura ( $^\circ\text{C}$ ) | 20,3  | 10                  | 13   | 2,4  | 8,5  |

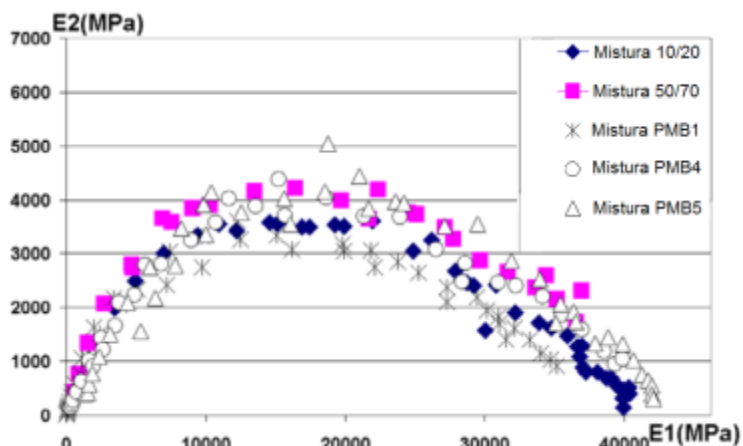
Os resultados valores de Tsuperposição muito similares tanto para as curvas equivalência frequência temperatura do ligante como para as curvas equivalência frequência temperatura da misturas confirmam que a suscetibilidade térmica da mistura e regida pelo ligante (OLARD, 2003).

Observa-se na Figura 39, uma boa superposição das misturas asfálticas, ressaltando que para a mistura formulada com CAP10/20, é necessário transladar está, a uma temperatura de  $20,3^\circ\text{C}$ . Para conseguir uma superposição das curvas com a mistura formulada com CAP50/70.



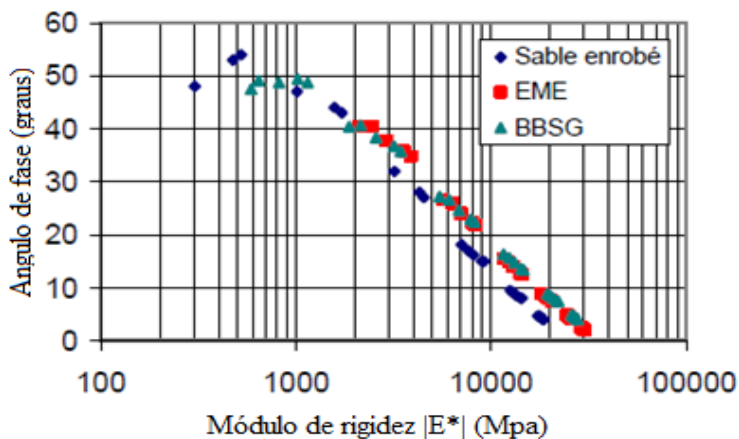
**Figura 39.** Superposição da curva equivalencia frecuencia temperatura (OLARD, 2003).

Na Figura 40, é ilustrada a representação destas misturas no plano Cole-Cole.



**Figura 40.** Representação no plano Cole-Cole (OLARD, 2003).

A Figura 41, ilustra a variação do ângulo de fase e módulo de rigidez para dois tipos de misturas asfálticas estudadas por CASTANEDA (2003). Nestas curvas observa-se também quanto o tipo de ligante e composição da mistura asfálticas influencia no comportamento reológico e observando uma menor variação do ângulo de fase para a mistura de módulo elevado ilustradas no espaço Black.



**Figura 41.** Modulo complexo das misturas, espaço Black, (CANSTANEDA, 2003).

Este comportamento é observado também na representação no plano Cole e Cole, ilustrado na Figura 42, observando uma variação ao comparar as curvas correspondentes à mistura com ligante 10/20 (EME) com a mistura com ligante 50/70 (BBSG).

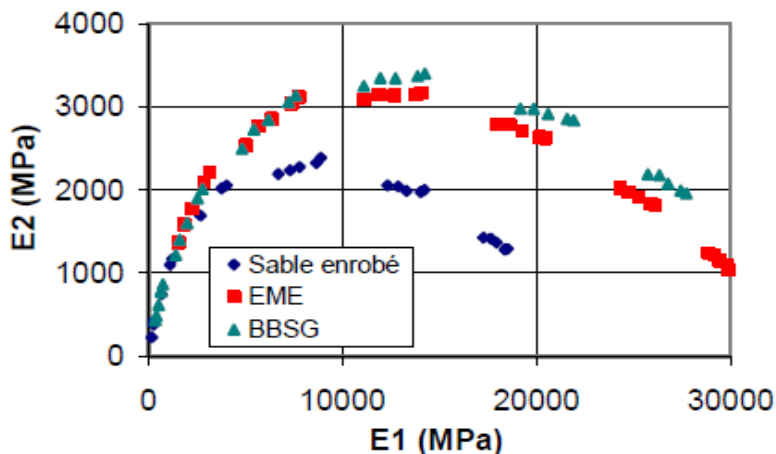


Figura 42. Modulo complexo, no plano Cole-Cole (CASTANEDA, 2003).

### 3.8.2 Influência do tipo de agregados e composição granulométrica

A forma, natureza e tamanho dos grãos afetam o comportamento mecânico das misturas asfálticas (De La ROCHE, 1996; RIVIERE, 1996; MOMM, 1998). A forma dos grãos influencia na densificação da mistura no processo de compactação. A redução da deformação permanente devido ao aumento da densidade é mais importante para os materiais granulares angulares (MOMM, 1998). A forma dos granulares afeta a resistência à fadiga dos concretos asfálticos devido ao atrito interno entre as partículas, alterando a energia dissipada e, por conseguinte, o comportamento mecânico (RIVIERE, 1996).

O tamanho máximo e a distribuição granulométrica afetam diretamente a compacidade da mistura asfáltica. O bom arranjo entre os grãos é dado pela acomodação das partículas e pela sua graduação. A granulometria influi no comportamento mecânico dos concretos asfálticos.

### 3.8.3 Influência dos finos

Ao aumentar o teor de finos (material passante na peneira nº200) o “n” da curva granulométrica diminui apresentando uma maior densificação na compactação. Os finos aumentam a compacidade da mistura asfáltica e afetam o seu comportamento mecânico, com o aumento da percentagem de finos aumenta-se a rigidez da mistura, existe uma percentagem de finos ótima para um bom comportamento do material. A resistência a fadiga pode diminuir se este valor for ultrapassado.

### 3.8.4 Influência das solicitações aplicadas

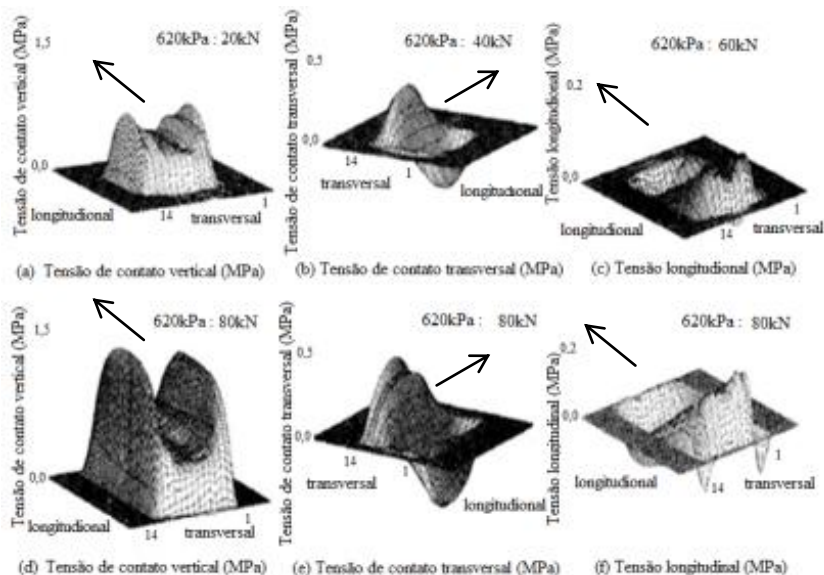
A velocidade da carga é um fator a se ter presente na avaliação da resistência dos materiais betuminosos à fadiga, no módulo complexo e na deformação permanente. O comportamento dos materiais betuminosos depende fortemente da velocidade de aplicação da carga. Cargas aplicadas lentamente são mais importantes para avaliar o afundamento por trilha de roda.

No campo, a resposta à ação da carga sobre o concreto asfáltico depende do tipo de roda, da pressão de insuflagem dos pneus, da velocidade de aplicação da carga. As numerosas medidas realizadas por (De Beer e Fisher em 1997) na África do Sul, confirmam que a impressão do pneu tem uma largura quase constante, igual a uma banda de rolamento, que não depende nem da carga, nem da pressão de insuflagem (Figura 43) (PERRET, 2003). Pode-se observar, também, que o comprimento varia para valores de pressão constante. Variando a carga, o comprimento da zona de contato é variável.



**Figura 43.** Impressão do pneu em função do tipo de eixo e pressão (PERRET, 2003).

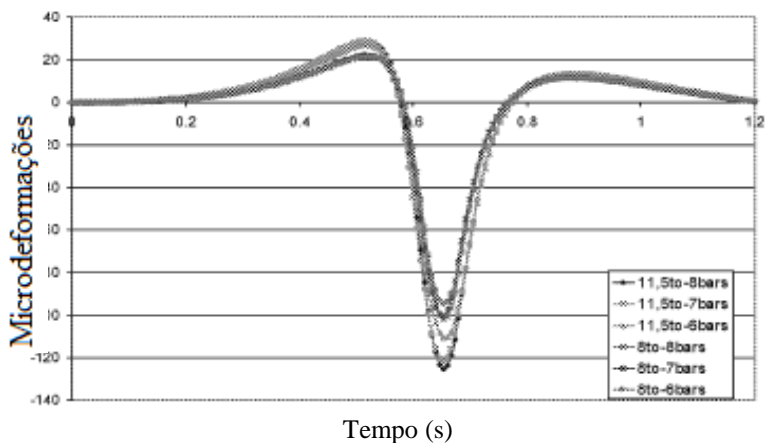
Na Figura 44, ilustra-se as tensões na superfície de contato para diferentes combinações de pressão de insuflagem e tensão aplicada, a transmissão de esforços e impressão do pneu muda consideravelmente de uma configuração para outra.



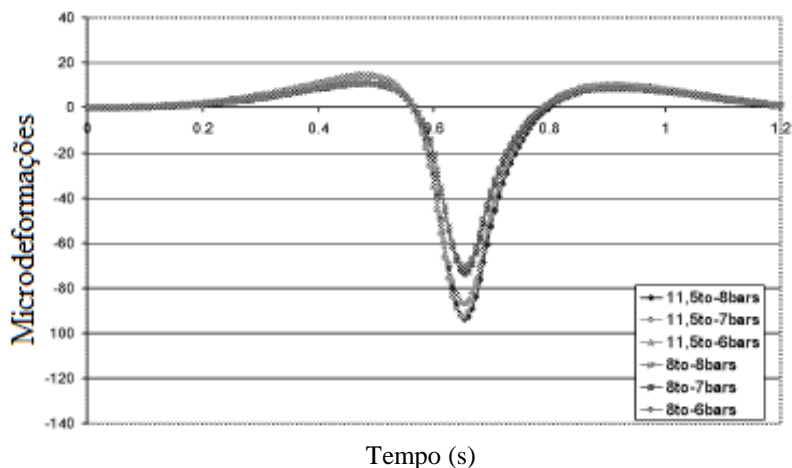
**Figura 44.** Medida da repartição das pressões de contacto do pneu para diferentes condições de carga (DE BEER, 1997; PERRET, 2007).

Em ensaio experimental de campo, com o aumento da carga de 8t para 11,5t, há um incremento do sinal de deformação o qual é função da temperatura e pressão de insuflagem (PERRET, 2003).

Na Figura 45 e Figura 46, ilustra duas situações de carga estudadas por PERRET (2003), para uma estrutura de módulo elevado de 17cm e temperatura de 15°C. Comparando os gráficos observa-se que na medida em que a pressão de insuflagem aumenta de 6bar para 8bar os picos de distensão do sinal de deformação também aumenta para uma mesma condição de carga, tanto para a configuração de eixos simples como para a configuração de eixos duplos. Em relação ao pico de distensão para a carga de 11,5t para 8t o sinal de deformação diminui.



**Figura 45.** Sinal de deformação na fibra inferior da camada de base (EME) a 15°C e estrutura de 17cm para roda simples no sentido longitudinal (PERRET, 2003).



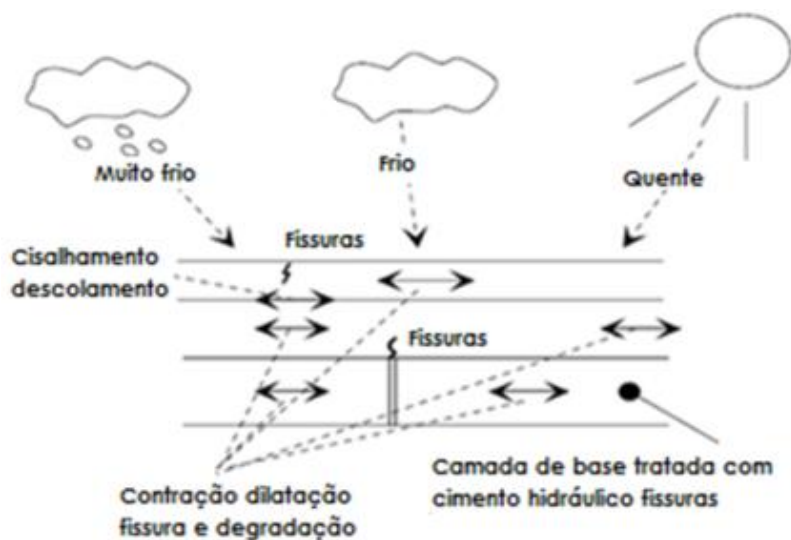
**Figura 46.** Sinal de deformação na fibra inferior da camada de base (EME) a 15°C e estrutura de 17cm para roda dupla no sentido longitudinal (PERRET, 2003).

### 3.8.5 Influência das condições climáticas

A temperatura é um parâmetro determinante sobre o comportamento dos materiais betuminosos, pois a mistura betuminosa é termicamente susceptível, isto é, suas propriedades dependem fortemente da temperatura. Nas baixas temperaturas a mistura asfáltica apresenta uma rigidez elevada e pode mostrar um comportamento frágil.

A temperatura elevada apresenta baixa rigidez e uma deformabilidade importante, estas propriedades são responsáveis pela deformação permanente (De La ROCHE, 1996).

Nas baixas temperaturas, o ligante possui um comportamento frágil, e o pavimento é susceptível à fissuração por efeito combinado do tráfego e condições climáticas. Certamente a fissuração térmica pode ser evitada com a utilização de ligantes menos consistentes e, por conseguinte, menos quebradiços a baixas temperaturas. Não obstante, um asfalto menos consistente pode revelar problemas de afundamento (deformações permanentes do pavimento) a elevadas temperaturas. O asfalto ideal deve ser menos susceptível aos fenômenos de fissuração térmica a baixas temperaturas e afundamentos a elevadas temperaturas. (OLARD, 2003), Na Figura 47, é ilustrada as solicitações e efeitos da temperatura nas camadas do pavimento.



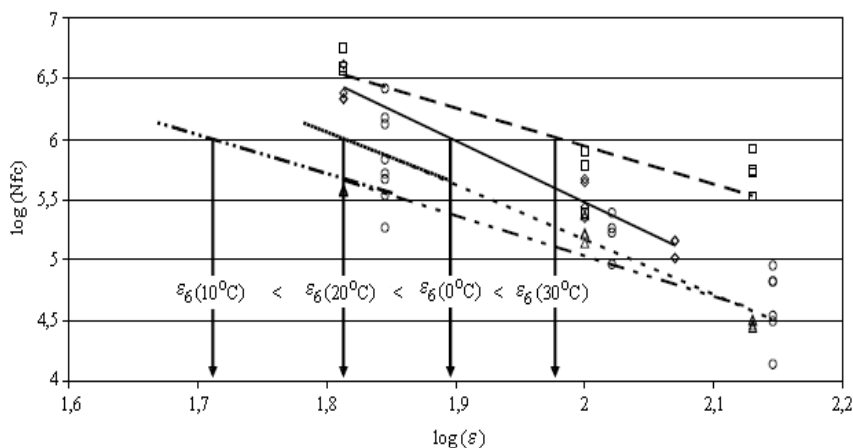
**Figura 47.** Solicitações induzidas pela temperatura (OLARD, 2003).



Pode-se exigir à mistura duas qualidades principais em relação direta com ligante dependente da temperatura: Estabilidade suficiente para garantir a resistência à deformação permanente a temperatura elevada e flexibilidade para suportar fissuração térmica a baixas temperatura.

No envelhecimento do material devido à temperatura podem-se observar dois efeitos mecânicos principais: a mudança no módulo do material e o surgimento de esforços e deformações devido às contrações e dilatações térmicas sofridas pela mudança de temperatura (OLARD, 2003).

O ensaio de fadiga é realizado a temperatura de 10°C e 25Hz. Diversas experiências mostram que a temperatura crítica do material está em torno deste valor para misturas formuladas com ligante 50/70. Na Figura 48, são ilustradas quatro curvas de fadiga, realizadas a diferentes temperaturas para misturas do tipo *grave-bitume* classe 3, sendo a natureza dos granulares de origem calcário, a granulometria 0/14 e teor de ligante de 4,6% com penetração 50/70, as temperaturas avaliadas correspondem (0°C, 10°C, 20°C e 30°C). Constata-se a diminuição progressiva da deformação correspondente para um milhão de solicitações, convergindo à temperatura de 10°C.



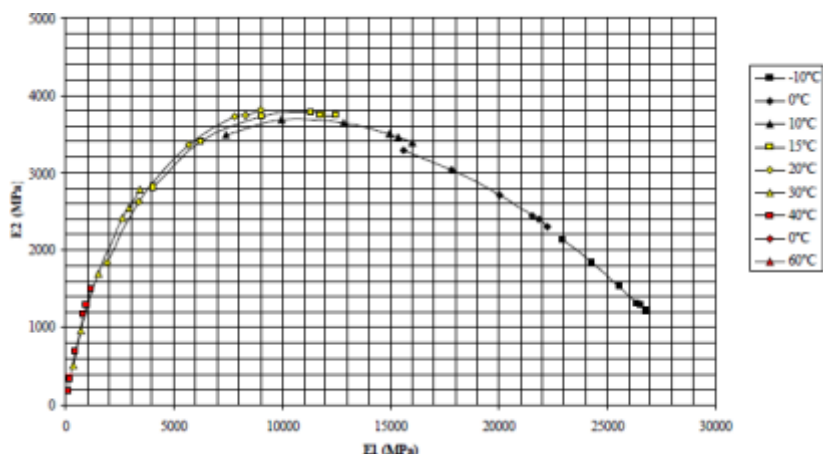
**Figura 48.** Curvas de fadiga para diferentes temperaturas a 40Hz, mistura GB e com 4,6% de ligante 50/70 (DOMEK, 2005).

A Tabela 17 apresenta os resultados obtidos por DOMEK (2005) para as curvas de fadiga para uma mistura GB3.

**Tabela 17.** Características em fadiga e modo contínuo para misturas GB3 e 4,6% de ligante 50/70 (DOMECC, 2005).

| Temperatura | Inclinação da curva de fadiga | $\varepsilon_6 (10^{-6})$ | $\Delta\varepsilon_6(10^{-6})$ |
|-------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| 0°C         | -5.1                          | 79                        | 8.2                            |
| 10°C        | -3.3                          | 51                        | 6                              |
| 20°C        | -4.5                          | 65                        | 7.5                            |
| 30°C        | -3.2                          | 95                        | 10.8                           |

Na Figura 49, é representado o módulo da mistura no plano Cole-Cole, observa-se que a temperatura crítica para a qual o material apresenta um maior módulo de perda é aproximadamente nos 10°C para misturas formuladas com ligantes de consistência 50/70.



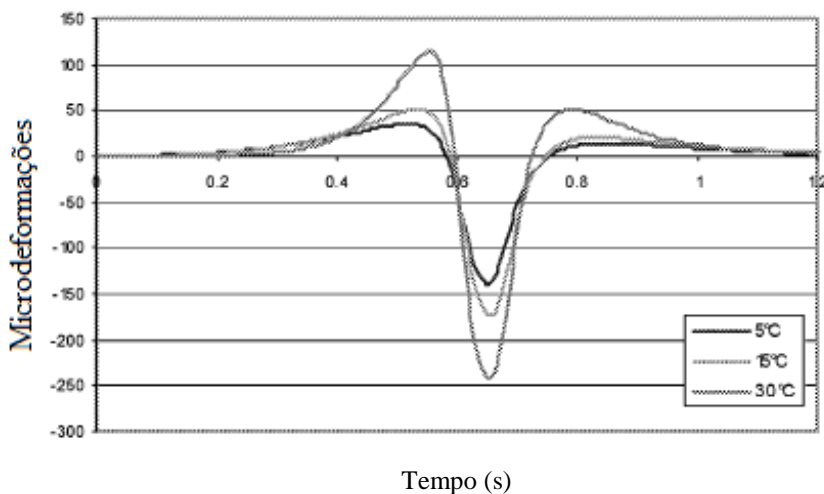
**Figura 49.** Módulo complexo dentro do plano complexo mistura GB3 (DOMECC, 2005).

A temperatura e a frequência de ensaio influenciam notadamente no comportamento à fadiga das misturas asfálticas. Estudos comparativos entre diferentes tipos de misturas asfálticas sob condições de ensaios diferentes, mostram a tendência de variação da deformação correspondente para um milhão de solicitações. Na Tabela 18, são apresentados resultados do ensaio de fadiga para condições de ensaio diferentes.

**Tabela 18.** Resultados de fadiga para diferentes condições de ensaio (De La Roche 1997).

| Mistura | 10°C e 25Hz<br>LCPC | 20°C e 25Hz<br>LCPC | 20°C e 40Hz<br>LCPC ou<br>LR Bordeaux |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|
| BB A    | 90±5                | 140±6               | 96±5                                  |
| BB B    | 140±10              | 169±9               | 140±9                                 |
| BB S    | 175±6               |                     | 237±8                                 |
| EME C   | 140±6               | 159±10              | 130±5                                 |
| EME D   | 141±4               |                     | 133±5                                 |
| GB A    | 88±11               | 91±7                | 87±8                                  |

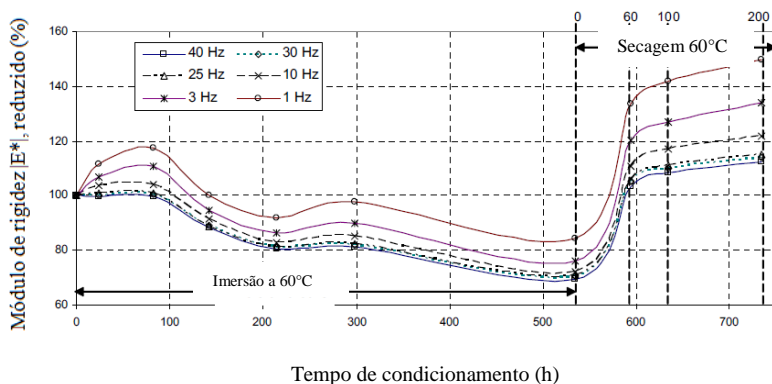
A amplitude do sinal de deformação varia em função da temperatura, devido à perda de rigidez das camadas de concreto asfáltico, aumentando os picos de contração e distensão. Esta variação é ilustrada de maneira geral na Figura 50.



**Figura 50.** Sinal de deformação na camada de base (EME2), para diferentes temperaturas, estrutura espessura 10cm (PERRET, 2003).

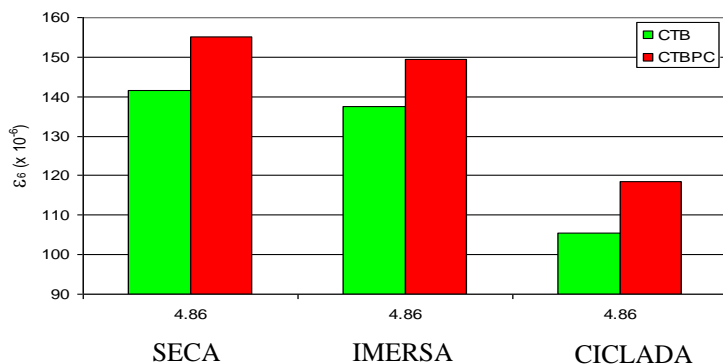
A deterioração dos concretos asfálticos dá-se, além do carregamento repetido e da temperatura, pelo efeito da água. Para a frequência mais baixas observa-se um aumento da rigidez após das primeiras horas de imersão. No final da imersão após da secagem um aumento forte em relação aos valores iniciais (Figura51) (CASTANEDA, 2004).

Observa-se também que na presença da água, a rigidez da mistura apresenta uma queda e após da secagem um aumento da rigidez.



**Figura 51.** Evolução do módulo de rigidez após de ciclos de imersão e secagem (CASTAÑEDA, 2005).

A influência da água também pode-se constatar no ensaio de fadiga sob condições simuladas de imersão na água, tanto pela diminuição da deformação correspondente para um milhão de ciclos como no cálculo das espessuras do pavimento. Na Figura 52, são ilustradas duas misturas asfálticas correspondentes a uma curva teórica com brita (CTB) e outra correspondente a uma curva teórica com brita e pó calcário (CTBPC) (BARRA, 2009).



**Figura 52.** Deformações calculadas para  $10^6$  ciclos, para as misturas asfálticas CTB e CTBPC (BARRA, 2009).

### 3.9 DIMENSIONAMENTO DO PAVIMENTO

Sob o efeito das solicitações externas (condições de carga, ambiente) as estruturas de pavimentos estão sujeitos a fenômenos complexos (mecânica, térmica, física e química). Dada esta complexidade, os métodos empíricos apresentam limitações que são visíveis quando trata-se nos novos tipos de estruturas, materiais ou com aumento do tráfego. Sendo necessário desta forma o desenvolvimento de métodos de dimensionamento mais racionais. Esta necessidade levou ao desenvolvimento, e aplicação na década de 1970, do método francês racional (SETRA-LCPC, 1994; DIAKHATE, 2007).

Nesta abordagem, a determinação da espessura das camadas do pavimento é realizada considerando as características mecânicas dos materiais. É tanto uma abordagem experimental (fundamental) para sua verificação de cálculo racionalmente (método racional). Em contraste com os modelos empíricos, estes métodos racionais envolvem o uso combinado dos modelos mecânicos e os dados experimentais. É, através de modelos de cálculo, verificado o dimensionamento da estrutura de pavimento (SETRA-LCPC, 1994; DINKHATE, 2007).

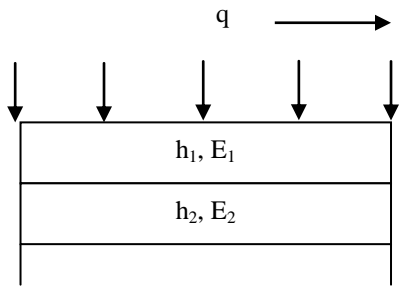
Do ponto de vista mecânico, o dimensionamento Francês pode ser dividido em três etapas principalmente. Em uma primeira, realiza-se a concepção do tipo de estrutura e solicitações. Em uma segunda etapa, determina-se os valores admissíveis de deformação dos materiais estruturais dependendo da sua posição na estrutura do pavimento, camadas de base ou sub-base e camadas de material não tratado ou de fundação (*plate-forme*) em função do tráfego acumulado (número de caminhões pesados) durante a vida em serviço.

Em uma terceira etapa calculam-se as respostas das camadas do pavimento a um eixo simples duplo de referência de 130kN, área de contacto de raio 0,125m e distancia entre eixos de 0,37m, em função do tipo de pavimento escolhido de partida (tipo de estrutura, materiais e espessuras das camadas constituintes). Determinando o campo de deformações das camadas betuminosas, das camadas de materiais não tratados e da plataforma de fundação (*plate-forme*).

O dimensionamento das camadas do pavimento é baseado no comportamento em fadiga das misturas betuminosas. Neste enfoque é necessário o conhecimento do módulo de rigidez dos materiais para o cálculo das deformações das camadas betuminosas. Devido às cargas externas, é efetuado sobre um modelo de camadas construídas sucessivamente (De La ROCHE 1996) (Figura 53).

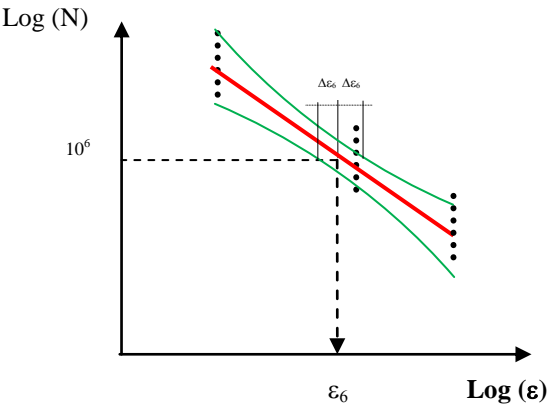
**ETAPA 1:**  
**Modelização**

Estrutura e solicitações



**ETAPA 2:**  
**Parâmetros das misturas**  
**determinação,  $\epsilon_{adm}$**

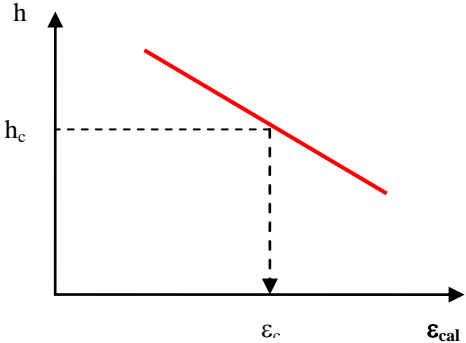
Determinação:  
 $\epsilon_6$  : Deformação para um milhão de ciclos  
 $\Delta \epsilon_6$  : Variação  $\epsilon_6$   
 $B$  : inclinação da curva  
 $SN$  : desvio padrão dos resíduos



**ETAPA 3:**  
**Avaliação  $\epsilon_{calculado}$**

Calculo das deformações  
Elástico: Evertress  
Viscoelástico: Viscoroute  
CVCR.

$\epsilon_{calculado} \leq \epsilon_{admissível}$



**Figura 53.** Dimensionamento racional do pavimento (MOMM, 1998).

As espessuras das camadas do pavimento são consideradas adequadas quando as deformações induzidas pela passagem do eixo de referência permanecem iguais ou inferiores as deformações admissíveis para cada camada. A escolha da estrutura final é feito através de cálculos iterativos (equacao 48).

$$\varepsilon_{calculada} \leq \varepsilon_{admissível} \quad (48)$$

Sendo verificada a deformação longitudinal ( $\varepsilon_{xx}$ ) para os materiais betuminos e a deformação ( $\varepsilon_{zz}$ ) vertical nas camadas de solo não tratado ou na plataforma de fundacao (*plate-forme*).

### 3.9.1 Deformação calculada na base da estrutura modelizada

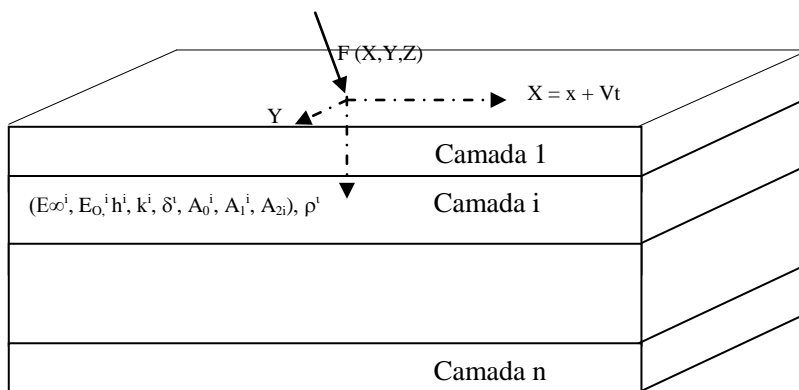
Os pavimentos podem ser dimensionados considerando a carga estática através da análise mecanicista, baseado no modelo de Burmister's (1943). O método de dimensionamento Frances (SETRA-LCPC, 1997) para a análise da estrutura de pavimento baseia-se no neste modelo com uso do programa ALIZE. Este é um modelo estático 2D, onde cada camada é considerada homogênea e elástica. A viscoelasticidade é levada em conta através do módulo elástico equivalente determinado no ensaio de módulo complexo. O módulo elástico equivalente é fixo para uma temperatura de 15°C, que é a temperatura média na França e na frequência de 10Hz, que teoricamente seria a velocidade a 72km/h, velocidade média dos veículos na França (CHABOT et al., 2010).

Atualmente há ferramentas computacionais de análise que permitem modelar de uma maneira mais realista as solicitações externas sobre o pavimento, sobretudo quando tratam-se de situações mais complexas, como são tráfego lento e as configurações de eixos variadas. Além disso, estes modelos permitem avaliar as respostas do pavimento para diferentes condições de temperatura.

Na França, o LCPC (DUHAMEL et al., 2005) desenvolveram o modelo 3D, que está incorporado no programa *ViscoRoute*. Este programa integra a viscoelasticidade dos materiais asfálticos diretamente através do modelo de Huet-Sayegh. O modelo consiste em utilizar o modelo reológico de comportamento das misturas asfálticas formulado por Huet-Sayegh e a dupla transformada de Fourier para

resolver analiticamente o problema ao longo da profundidade e espaço para o número de ondas horizontais.

O sistema é levado de uma referência fixa a uma referência em movimento, que integra a velocidade, sendo solucionado pela dupla transformada de Fourier nas direções longitudinal e transversal, calculando as deformações e as tensões nas diferentes posições da estrutura de acordo com a intensidade de carga, a temperatura, e a velocidade do veículo (DUHAMEL et al., 2005; CHABOT et al., 2006). Detalhes sobre as deduções do modelo são realizadas por (NGUYEN, 2002; DUHAMEL et al., 2005) (Figura 54).



**Figura 54.** Modelização da estrutura do pavimento considerando as camadas viscoelásticas e modelo de Huet-Sayegh (DUHAMEL et al., 2005).

Onde:

$F_X, F_Y, F_Z$  = Vetor de forças (Newton);

$V$  = velocidade da carga m/s;

$\rho$  = massa específica da camada  $i$ ;

$E_{\infty}$  = módulo elástico instantâneo;

$E_0$  = módulo elástico estático;

$k, h, \delta$  = Coeficientes do modelo de Huet Sayegh;

$\nu$  = Coeficiente de Poisson;

$\theta$  = Temperatura;

$A_0, A_1, A_2$  = evolução dos coeficientes com respeito à temperatura.



### 3.9.2 Deformações admissíveis

Os valores de deformação admissível dos materiais das camadas do pavimento são determinados a partir do comportamento em fadiga dos materiais, do tráfego acumulado e do risco de cálculo. Um coeficiente de calage é considerado para corrigir erros entre a predição de cálculo e o comportamento observado (equação 49) (SETRA-LCPC, 1997).

$$\varepsilon_{t,adm} = \varepsilon(NE, T_{eq}, f) \cdot k_s \cdot k_r \cdot k_c \quad (49)$$

Onde:

$\varepsilon_{t, adm}$  = Deformação admissível na base das camadas de concreto asfáltico;

$\varepsilon(NE, T_{eq}, f)$  = Deformação em função do número de eixos equivalentes, da temperatura equivalente e da frequência;

$k_r$  = coeficiente que ajusta o valor do cálculo do risco de deformação horizontal em função dos fatores de dispersão da espessura da camada (desvio padrão  $S_h$ ) e os resultados do ensaio de fadiga (desvio padrão  $S_N$ );

$k_s$  = coeficiente devido a heterogeneidade da capacidade de suporte;

$k_c$  = coeficiente de calage destinado a ajustar os resultados do modelo de cálculo ao comportamento observado de um pavimento do mesmo tipo (1,3 para misturas GB e 1,0 para misturas EME).

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (50)$$

Onde:

$u$  = variável associada ao risco;

$b$  = inclinação da curva de fadiga;

$\delta$  = desvio-padrão da distribuição do  $\log(N)$  para  $10^6$  ciclos.

$$\delta = \left[ S_N^2 + \left( c \cdot \frac{S_H}{b} \right)^2 \right]^{0,5} \quad (51)$$

Onde:

$S_N$  = desvio padrão dos resíduos do ensaio de fadiga;

$S_h$  = dispersão sobre a espessura da camada;

$b$  = inclinação da curva de fadiga;

c = coeficiente relacionado à variação da deformação admissível, em função da variação da espessura da camada, aproximadamente é utilizado igual a  $2m^{-1}$ .

$$\varepsilon(NE, T_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ C, 25Hz) \cdot \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{-b} \cdot \left(\frac{E(10^\circ C)}{E(T_{eq})}\right)^{0.5} \quad (52)$$

Onde:

NE = Número de eixos equivalentes para o dimensionamento;

$\varepsilon_6$  = Deformação correspondente para um milhão de ciclos determinada do ensaio de fadiga, determinada a  $10^\circ C$  e 25Hz;

E ( $10^\circ C$ ) = Módulo medido a  $10^\circ C$  e 10Hz;

E ( $15^\circ C$ ) = Módulo medido a  $15^\circ C$  e 10Hz (sendo  $15^\circ C$  a temperatura equivalente na França);

b = inclinação da curva de fadiga.

As misturas de modulo elevado e *grave-bitume* sao utilizadas principalmente em situações de tráfego intenso, nas camadas de apoio do pavimento (base e sub-base), onde a deformação calculada na fibra inferior da camada de maior profundidade deve ser inferior a deformacao admissivel calculada pela (equacao 52).

As camadas na França são contruídas em conjunto sobre uma plataforma de fundação (*plate-forme*) compreendendo: o subleito (corte ou aterro, ou solo natural) designado na sua região superior (1m de espessura) como parte superior de terraplenagem (PST) constituindo sua superfície do arado de terraplenagem (AR); E a camada de regularização (*couche de forme*) eventualmente (SETRA-LCPC, 1997).

A abordagem utilizada para a definição e acompanhamento dos trabalhos de adequação do suporte da estrutura do pavimento terraplenagem e plataforma de fundação (*plate-forme*), foi inicialmente definido segundo o documento da *Direction des routes intitulé Recommandation pour les terrassements routiers* (RTR 7)(1976). Após de 15 anos de experiência o documento foi revisado e republicado em 1992, como uma guia técnica LCPC-SETRA *réalisation des remblais et des couches de forme* (GTR).

A abordagem deste guia é organizado da seguinte forma:

- Classificação de solos e materiais rochosos adequados para problemas de terraplenagem que reagrupa em classes os materiais das mesmas condições de utilização;

- definição das condições de utilização dos materiais da camada de regularização (*couche de forme*);
- e as regras estabelecidas para a compactação do subleito e camada de regularização (*couche de forme*).

Na Tabela 19, são apresentados as classes de capacidade suporte da superfície AR e na Tabela 20, as classes de capacidade do plataforma de fundação (Plate-Forme).

**Tabela 19.** Classes de capacidade de suporte da superfície (AR) (SETRA-LCPC, 1997).

| Módulo Mpa           | 20  | 50  | 120 | 200 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|
| Classe de superfície | AR1 | AR2 | AR3 | AR4 |

**Tabela 20.** Classes de capacidade da plataforma de fundação (PF) (SETRA-LCPC, 1997).

| Módulo Mpa   | 20  | 50  | 120 | 200 |
|--------------|-----|-----|-----|-----|
| Classe de PF | PF1 | PF2 | PF3 | PF4 |

Para os materiais granulares não tratados, a plataforma de fundação (*plate-forme*) ou subleito deve-se verificar que a deformação calculada  $\varepsilon_z$  seja inferior a deformação admissível calculada pela equação 53 ou equação 54 em função do tráfego.

Para pavimentos com tráfego médio e elevado ( $T \geq T_3$ )

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,012(NE)^{-0,222} \quad (53)$$

Para pavimentos com tráfego baixo ( $T < T_3$ )

$$\varepsilon_{z,adm} = 0,016(NE)^{-0,222} \quad (54)$$

Entre os fatores que são levados em conta no dimensionamento podem-se enumerar o tráfego, as condições ambientais, o suporte do pavimento (*plate-forme*), os materiais das camadas e a qualidade de realização. A classe de tráfego  $T_i$  é determinada a partir do tráfego médio diário anual (MJA) do primeiro ano de operação. As classes de tráfego são definidas na (Tabela 21).

**Tabela 21.** Definição da classe de tráfego (SETRA-LCPC, 1997).

| Classe | T5 | T4 | T3  |     | T2  |     | T1  |     | T0  |      | TS   |      | TEX  |
|--------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|        |    |    | T3- | T3+ | T2- | T2+ | T1- | T1+ | T0- | T0+  | TS-  | TS+  |      |
| MJA    | 0  | 25 | 50  | 85  | 150 | 200 | 300 | 500 | 750 | 1200 | 2000 | 3000 | 5000 |

Para situações de tráfego pesado é comum utilizar camadas espessas, tratadas com cimento asfáltico para as camadas de base e sub-base. Podendo ser utilizado o mesmo tipo de material nas camadas subjacentes, caso seja necessário, de maneira que as deformações calculadas sejam inferiores às deformações admissíveis dos materiais.

A camada de superfície pode ser contida de camada de ligação (eventualmente) e de uma camada de rolamento. A camada de ligação pode ser projetada com misturas do tipo BBME (NF P 98 -141) com espessura de utilização entre 5cm a 8cm. Para a camada de rolamento com espessura inferior a 5cm é comum utilizar mistura betuminosa do tipo BBTM (NF P 98 -137), com espessura entre 2 a 3 cm, com bom comportamento em relação à deformação permanente.

As espessuras das misturas de módulo elevado (EME) são inferiores aos de *grave-bitume* (GB), pois por ser mais rico em ligante asfáltico torna mais manejável e mais estruturante. Também é mais impermeável, o que permite a colocação direta de um asfalto muito fino (BBTM), não necessariamente utilizando-se camada de ligação (BROSSEAUD, 2003).

As misturas do tipo BBTM podem ser aplicadas diretamente sobre as misturas GB pelo elevado conteúdo de ligante e devido à elevada rigidez da estrutura, garante seu bom comportamento (FERREIRA, 2006). A mistura de módulo elevado comparado a um *grave-bitume* (GB), a elevada rigidez reduz tensões no material da camada inferior, que é favorável a uma redução na espessura, sob a mesma carga de tráfego. Além disso, os maiores valores de  $\varepsilon_6$  a 15°C para a EME Classe 2 permitem o cálculo da tensão admissível de valores superiores aos de GB (BROSSEAUD, 2003). Na Tabela 22 é ilustrada dois tipos de estruturas para situações de tráfego intenso T0.

**Tabela 22.** Comparação de estruturas GB – EME (BROSSEAUD, 2006)

| <i>Guide des structures types de chaussées neuves (SETRA/LCPC 1998)</i> |         |         | <i>Manuel de conception de SCETAUROUTE</i> |         |         |
|---|---------|---------|--|---------|---------|
| FICHA   | N1 GB 2 | N3 EME2 | COMPARAÇÃO                                 | GB3     | EME2    |
| BBTM  | 2.5 cm  | 2.5 cm  | BBTM                                       | 2.5 cm  | 2.5 cm  |
| BBSG  | 6.0 cm  | 6.0 cm  | BBME                                       | 5.0 cm  | -       |
| BASE  | 14.0 cm | 9.0 cm  | BASE                                       | 11.0 cm | 10.0 cm |
| FUNDAÇÃO  | 14.0 cm | 10.0 cm | FUNDAÇÃO                                   | 13.0 cm | 10.0 cm |
| ESPESSURA TOTAL   | 36.5 cm | 27.5 cm | ESPESSURA TOTAL                            | 31.5 cm | 22.5 cm |

Trafego T0, 20 milhões de eixos equivalentes de 130 KN, Plataforma de fundação PF 3 E=120MPa

O manual de dimensionamento Francês *Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA, 1997) e o catálogo de estruturas de pavimentos novos (LPC, 1998) estabelecem as diretrizes para a concepção de pavimentos novos e a definição do tipo de estrutura de pavimento dependendo da classe de tráfego de veículos pesados (TCi), a classe do plataforma de fundação (*plate-forme*) (PFi) e da classe da via. Sendo a rede rodoviária francesa composta de duas classes de redes vias das redes estruturantes projetadas para um período de 30 anos e vias das redes não estruturantes projetadas para um período de 20 anos (LCP, 1998).

## 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordadas as características dos materiais, as curvas granulométricas e descrição dos ensaios realizados em cada nível de formulação como: ensaio de compactação por cisalhamento giratório (PCG) (NF P 98-252, 1999), ensaio Duriez (NF P 98-251-1, 1995), ensaio de deformação permanente (NF P 98-253-1, 1993), módulo complexo (NF P 98-260-2, 1992) e fadiga (NF P 98-261-1, 1993).

A escolha dos materiais e a formulação das misturas procuraram o objetivo de obter uma mistura de elevado desempenho para camadas com função estrutural do pavimento (base e sub-base).

Para os granulares foram realizados ensaios de caracterização de desgaste, índice de forma, durabilidade e massa volumétrica real. Nos ligantes foram realizados ensaios de penetração, viscosidade, ponto de amolecimento e densidade.

Os ensaios de caracterização dos materiais, preparação das curvas granulométricas, preparação das misturas asfálticas, o ensaio Duriez, de módulo complexo e resistência à fadiga foram realizados na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Os ensaios de deformação permanente e ensaio de compactação de cisalhamento giratório foram realizados na Escola Politécnica Universidade de São Paulo (EPUSP).

A pesquisa avaliou o desempenho para duas misturas com função estrutural, uma mistura de módulo elevado e uma mistura *grave-bitume*. O ensaio de fadiga foi realizado com deformação controlada em flexão alternada em modo contínuo sobre corpos-de-prova trapezoidais a uma temperatura 10°C e 25 Hz para ambas as misturas asfálticas, temperatura fixa na norma NF P 98-261-1, 1993, adicionalmente foram realizados ensaios de fadiga para a mistura de módulo elevado a 30°C e 25Hz, o ensaio de módulo complexo foi realizado para o espectro de temperaturas de -10°C a 40°C e frequências de 1Hz até 30Hz.

## 4.2 MATERIAIS

### 4.2.1 Materiais granulares

Os granulares utilizados são provenientes de uma suíte intrusiva de granito localizada no município de Palhoça. A seleção dos materiais para a formulação das misturas foi determinada pela caracterização quanto ao tamanho, à forma das partículas, a resistência dos granulares, e a afinidade com o asfalto.

Foram selecionadas amostras de Brita  $\frac{3}{4}$ , Pedrisco, e pó, verificando que cumpriram as normas mínimas exigidas, no ensaio de desgaste os Angeles que prescreve percentagem de perda inferior à 40% DNER-ME 035/98. O ensaio de durabilidade após 5 ciclos de imersão em sulfato de sódio deve ser inferior a 12% DNER-ME 089/94(Tabela 23).

**Tabela 23.** Características dos agregados.

| Característica          | Resultado | Norma          |
|-------------------------|-----------|----------------|
| Abrasão os Angeles      | 19.96%    | DNER-ME 035/98 |
| Durabilidade            | 1.02%     | DNER-ME 089/94 |
| Absorção                | 0.4%      | DNER-ME 081/94 |
| Ensaios granulométricos | -         | DNER-ME 083/94 |

O tamanho e separação das partículas foram determinados por peneiramento de acordo com a série de peneira 15,9 mm, 12,7mm; 9,5 mm; 4,76 mm; 2,36 mm; 1,19 mm; 0,59 mm; 0,29 mm; 0,149 mm; 0,075 mm; segundo a norma DNER-ME 083/94. O fíler (material de enchimento) utilizado para esta pesquisa corresponde ao material selecionado do pó de brita separado na peneira n°200.

### 4.2.2 Material betuminoso e adesividade ao granular

Os materiais betuminosos utilizados para esta pesquisa correspondem a dois tipos de ligantes de elevada consistência com o propósito de atingir os objetivos e cumprir especificações mínimas, segundo a normativa francesa para as misturas formuladas.

Na mistura de módulo elevado é utilizado ligante com penetração entre 10/20 décimos de milímetros, fornecido pela refinaria REPAR, denominado resíduo de vácuo. Para a mistura *grave-bitume* foi utilizado CAP30/45 fornecido pela refinaria REPLAN.

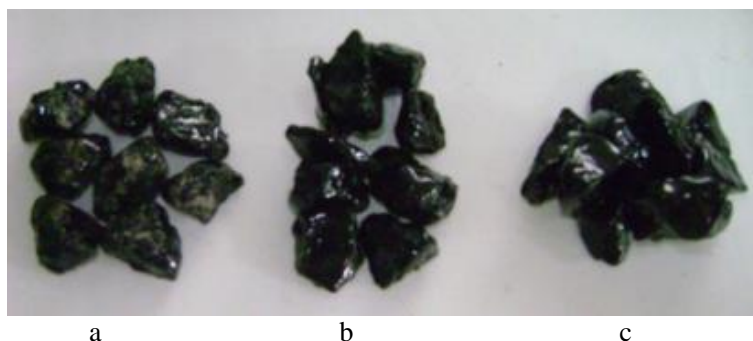
Os ligantes asfálticos foram caracterizados através do ensaio de ponto de amolecimento (ABNT NBR 6560/05, 2005), penetração

(ABNT NBR 6576/05, 2005), e viscosidade Saybolt-Furol (ABNT NBR 14950/05, 2005). Os resultados dos ensaios são apresentados na Tabela 24.

**Tabela 24.** Características dos ligantes utilizados.

| Parâmetro               | CAP 30/45              | CAP 10/20 RV           |
|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Penetração a 25°C, (10) | 37x10 <sup>-1</sup> mm | 10x10 <sup>-1</sup> mm |
| Ponto de amolecimento   | 55°C                   | 66°C                   |
| Densidade               | 1.01 g/cm <sup>3</sup> | 1.02 g/cm <sup>3</sup> |

Foram realizados ensaios de adesividade do agregado graúdo, segundo a norma DNER-ME 78-94, havendo descolamento do ligante-granular. Para melhorar a adesividade do ligante ao material granular, foram realizados testes com adição de 0.5% e 1% dope (Betudope de Ipiranga), o qual é um aditivo que ativa a adesividade. A partir de 0.5% de dope foram encontrados valores satisfatórios de adesividade (Figura 55).



**Figura 55.** Adesividade (a) 0% dope, (b) 0.5% dope, (c) 1% dope.

Com o propósito de garantir uma boa adesividade granular-ligante, todas as misturas foram ensaiadas com adição de 1% de dope. Para garantir a homogeneidade do dope no ligante, este foi previamente aquecido e foi colocada a quantidade de dope correspondente a 1%, e misturado durante 10 min. As temperaturas de usinagem e compactação foram determinadas a partir do ensaio Saybolt-Furol. Na Tabela 25, são apresentadas as temperaturas de usinagem e compactação (Figura 56).



Tabela 25. Temperatura de mistura e compactação.

| Ligante             | CAP 10/20 (RV) | CAP 30/45 |
|---------------------|----------------|-----------|
| Agregados aquecidos | 185            | 175       |
| Ligante aquecido    | 175            | 165       |
| Mistura             | 175            | 165       |
| Compactação         | 165            | 155       |

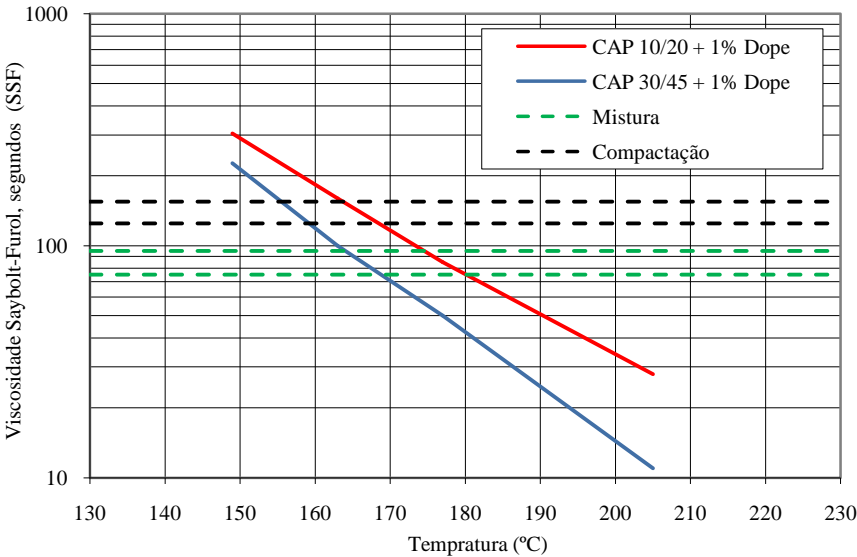


Figura 56. Curvas de viscosidade.

4.3 CURVAS GRANULOMETRICAS

Na escolha e definição das curvas granulométricas foram considerados os diâmetros máximos disponíveis 12,5mm; 15,9mm e 19,1mm. A norma francesa para misturas de módulo elevado e *grave-bitume* estabelece diâmetros máximos de 10mm; 14mm e 20mm. A espessura de utilização é função do tamanho máximo do granular. As normas NF P 98-138 para misturas *grave-bitume* e NF P98-140 para misturas de módulo elevado, fixam valores de espessura da camada mínima que devem ser respeitadas para os diferentes tipos de mistura em função do tamanho máximo do granular (Tabela 26).

**Tabela 26.** Espessuras de utilização das misturas de módulo elevado e *grave-bitume*.

| Mistura  | Espessura<br>mínima de utilização | Intervalo<br>de utilização |
|----------|-----------------------------------|----------------------------|
| EME 0/10 | 5 cm                              | 6 - 10 cm                  |
| EME 0/14 | 6 cm                              | 7- 12 cm                   |
| EME 0/20 | 8 cm                              | 10 -15 cm                  |
| GB 0/14  | 7 cm                              | 8 - 12 cm                  |
| GB 0/20  | 9 cm                              | 10 -15 cm                  |

O tamanho máximo foi fixado em 15,9mm para ambas as misturas. Para a formação da graduação foi utilizada a equação de Fuller-Talbot, garantindo uma distribuição granulométrica perfeitamente teórica, fixando o diâmetro máximo e o material passante na peneira n°200 e calculando o respectivo valor de n da curva granulométrica. Uma vez conhecido o expoente da curva foi definido o material para as séries de peneiras.

O material passante na peneira n°200 para a mistura de módulo elevado foi fixado em 7% e para a mistura *grave-bitume* em 5%. A diferença de material passante na peneira n°200 nas duas misturas teve o propósito de diminuir o consumo de ligante pela diminuição da superfície específica da composição (equação 55).

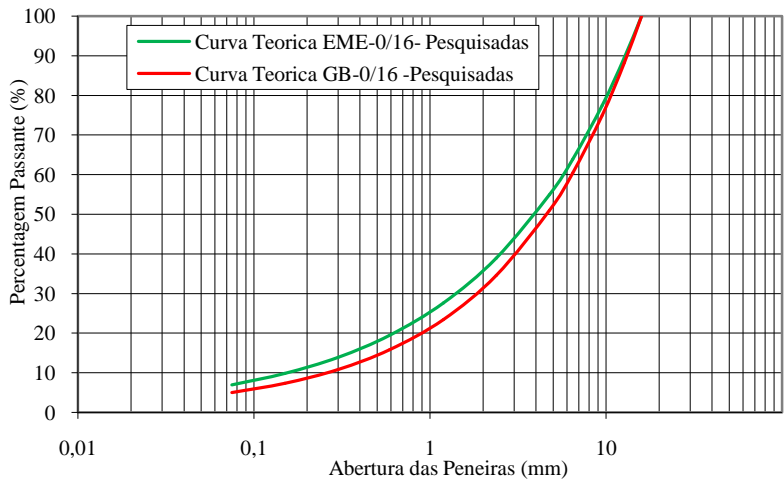
$$\%p = a \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (55)$$

%p = percentagem em peso que passa na peneira de abertura d;  
a = constante , tomada igual a 100;  
d = abertura da peneira, (mm);  
D = tamanho máximo, abertura da peneira que passa 100%, (mm);  
n = expoente da curva granulométrica.

A formação da graduação pela equação de Fuller-Talbot é função do tamanho máximo correspondente à peneira que passa 100%. A distribuição granulométrica definida pela equação 55 é apresentada na Tabela 27 e ilustrada na Figura 57.

**Tabela 27.** Distribuição granulométrica da misturas do estudo.

| Mistura de módulo elevado                 |                           | Mistura grave-bitume                      |                           |
|---|---------------------------|---|---------------------------|
| Expoente n da curva granulométrica = 0,50 |                           | Expoente n da curva granulométrica = 0,56 |                           |
| Abertura<br>mm                            | Material<br>Passante<br>% | Abertura<br>mm                            | Material<br>Passante<br>% |
| 15,9                                      | 100,0                     | 15,9                                      | 100,0                     |
| 12,7                                      | 89,4                      | 12,7                                      | 88,2                      |
| 9,5                                       | 77,4                      | 9,5                                       | 75,0                      |
| 6,45                                      | 63,9                      | 6,45                                      | 60,4                      |
| 4,76                                      | 54,9                      | 4,76                                      | 50,9                      |
| 2,38                                      | 39,0                      | 2,38                                      | 34,6                      |
| 1,19                                      | 27,6                      | 1,19                                      | 23,5                      |
| 0,59                                      | 19,5                      | 0,59                                      | 15,8                      |
| 0,3                                       | 13,9                      | 0,3                                       | 10,9                      |
| 0,15                                      | 9,9                       | 0,15                                      | 7,4                       |
| 0,075                                     | 7,0                       | 0,075                                     | 5,0                       |



**Figura 57.** Curvas granulométricas.

#### 4.4 RELAÇÕES VOLUMÉTRICAS

A percentagem de vazios ou compacidade da mistura é o parâmetro mais importante dentro do domínio de formulação. As propriedades dos materiais são dependentes do volume respectivo de esqueleto granular.

A massa específica volumétrica real da mistura é determinada diretamente sobre a mistura, segundo a norma NF EN 12697-5, pelo método A (equação 56) na água denotada como MVR. E pelo método C a partir das massas volumétricas dos componentes, segundo a norma NF EN 12697-5, denotado MVRc.

$$MVR = \frac{m_2 - m_1}{V_{pic} \frac{m_3 - m_2}{\rho_{\text{água}}}} \quad (56)$$

Onde:

MVR = massa específica volumétrica real da mistura asfáltica, em g/cm<sup>3</sup>;

m<sub>1</sub> = massa do conjunto picnômetro + água, em g;

m<sub>2</sub> = massa do conjunto picnômetro + água + amostra, em g;

m<sub>3</sub> = massa do conjunto picnômetro + água + amostra, após a bomba de vácuo, em g;

V<sub>pic</sub> = volume do picnômetro calibrado, em cm<sup>3</sup>;

ρ<sub>água</sub> = massa específica da água a uma determinada temperatura, em g/cm<sup>3</sup>.

$$MVRc = \frac{\text{Massa dos granulares} - \text{massa do betume}}{Vg + Vb} \quad (57)$$

$$MVRc = \frac{100 + TL_{ext}}{\frac{\%G_1}{\rho_{G1}} + \frac{\%G_2}{\rho_{G2}} + \dots + \frac{\%G_3}{\rho_{G3}} + \frac{TL_{ext}}{\rho_b}} \quad (58)$$

Ou

$$MVRc = \frac{100}{\frac{\%G_1}{\rho_{G1}} + \frac{\%G_2}{\rho_{G2}} + \dots + \frac{\%G_3}{\rho_{G3}} + \frac{TL_{int}}{\rho_b}} \quad (59)$$

Onde:

%Gi = porcentagem das frações granulares ρ<sub>Gi</sub>, as massas volumétricas respectivas;

ρ<sub>b</sub> = massa volumétrica do ligante.

Para os granulares foram preparadas as amostras em função da granulometria para cada tipo de mistura, e separados em materiais retidos na peneira 4,76mm e passante na peneira 4,76mm, determinando as massas volumétricas no vácuo e denominada MVRg, (equação 61).

$$MVR_g = \frac{M_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (60)$$

$$MVR_g = \frac{m_2 - m_1}{V_{pic} - \frac{m_3 - (m_2 - m_1) - m_{pic}}{\rho_{agua}}} \quad (61)$$

Onde:

$MVR_g$  = massa específica volumétrica real dos granulares, em  $g/cm^3$ ;

$M_{amostra}$  = massa da amostra, em g;

$m_1$  = massa do conjunto picnômetro + água, em g;

$m_2$  = massa do conjunto picnômetro + água + amostra, em g;

$m_3$  = massa do conjunto picnômetro + água + amostra, após a bomba de vácuo, em g;

$\rho_{água}$  = massa específica da água a uma determinada temperatura, em  $g/cm^3$ .

A massa volumétrica aparente foi determinada como a massa do corpo-de-prova ou placa pelo volume aparente. O volume aparente pode ser calculado em função das medidas geométricas (MVa) ou por passagem hidrostática com ou sem parafina (MVA), pela norma NF EN 12697-6, a massa volumétrica aparente pode igualmente ser calculado no gama dessimétrico denominada MVa $\gamma$  (NF EN 12697-7).

Nesta pesquisa só foram calculadas as massas volumétricas aparentes (MVa), pelas medidas geométricas no ensaio Duriez e por passagem hidrostática para todos os outros ensaios MVA. A compacidade e volumem de vazios é calculada pela equação 62 a equação 64.

$$C\% = \frac{MVA \text{ ou } MVa}{MVR} \cdot 100\% \quad (62)$$

$$v\% = \left(1 - \frac{MVA \text{ ou } MVa}{MVR}\right) \cdot 100\% \quad (63)$$

$$C\% + v\% = 100\% \quad (64)$$

$C\%$  = Compacidade;

$v\%$  = volume de vazios.

#### 4.5 TEORES DE LIGANTES DO ESTUDO

O teor de ligante mínimo do estudo é definido em função do módulo de riqueza mínimo para cada tipo de mistura, superfície específica dos granulares e massa volumétrica real (equação 65).

$$TL_{int} = \frac{100.K.\alpha.\sqrt[5]{\Sigma}}{100+(K.\alpha.\sqrt[5]{\Sigma})} \quad (65)$$

$$100.\Sigma = 0.25 G + 2.3 S + 12s + 135f \quad (66)$$

Onde:

- G = material superior a 6,3mm;
- S = material entre 6,3mm e 0,315mm;
- s = material entre 0,315mm e 0,08mm;
- F = material inferior a 0,08mm;
- $\alpha$  = 2,65/pg, com pg massa volumétrica dos granulares.

O teor de ligante interno é definido como a relação massa do ligante e a massa total (equações 67)

$$TL_{int} = \frac{\text{massa do ligante}}{\text{massa dos granulares} + \text{massa do ligante}} \cdot 100 \quad (67)$$

O teor de ligante externo  $TL_{ext}$  é calculado a partir do módulo de riqueza, da superfície específica dos granulares e da massa volumétrica dos granulares (equação 68). É definido conceitualmente pela relação entre a massa do ligante e massa dos granulares secos (equação 69).

$$TL_{ext} = K.\alpha.\sqrt[5]{\Sigma} \quad (68)$$

$$TL_{ext} = \frac{\text{masa do ligante}}{\text{massa granulares}} \cdot 100 \quad (69)$$

Os teores de ligante externo e interno podem ser relacionados pelas relações, (equação 70) e (equação 71).

$$TL_{ext} = \frac{100.TL_{int}}{100-TL_{int}} \quad (70)$$

$$TL_{int} = \frac{100.TL_{ext}}{100+TL_{int}} \quad (71)$$

A massa volumétrica real dos granulares (MVRg) determinada segundo a norma francesa (NF EM 12697-5), por imersão na água a vácuo no picnômetro. Para cada curva granulométrica estudada foi separado o material graúdo acima da peneira 4,75mm, e miúdo abaixo da peneira 4,75mm, e calculada a massa volumétrica para cada curva granulométrica pela ponderação das massas volumétricas das frações acima e abaixo da peneira 4,75mm.

O módulo de riqueza mínimo utilizado para a mistura de módulo elevado foi 3,4 e para a mistura *grave-bitume* 2,8. A superfície específica (equação 57) calculada para a mistura de módulo elevado foi  $\Sigma = 11,5 \text{ m}^2/\text{g}$  e para a mistura *grave-bitume*  $\Sigma = 8,7 \text{ m}^2/\text{g}$ . A massa volumétrica da composição granulométrica igual a  $2,7470 \text{ g/cm}^3$  para a mistura de módulo elevado e  $2,7458 \text{ g/cm}^3$  para a mistura *grave-bitume*.

A partir do módulo de riqueza mínimo, estabelecido para o tipo de mistura, e dos parâmetros mencionados anteriormente, os teores de ligante mínimos definidos para a mistura de módulo elevado e *grave-bitume* foram 5,07% e 4,00%, respectivamente (Tabela 28).

**Tabela 28.** Critério para a seleção dos teores de ligante.

| Mistura                              | Módulo de riqueza mínimo (K)        | MVRg                    |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Módulo elevado (EME classe 2)        | 3,4                                 | $2,7470 \text{ g/cm}^3$ |
| <i>Grave-Bitume</i> (GB classe 3)    | 2,8                                 | $2,7458 \text{ g/cm}^3$ |
|                                      |                                     |                         |
| <b>EME - CAP 10/20 (RV)</b>          | <b>GB - CAP 30/40</b>               |                         |
| $\Sigma = 11,5 \text{ m}^2/\text{g}$ | $\Sigma = 8,7 \text{ m}^2/\text{g}$ |                         |
| % Ligante mínimo = 5,07              | % Ligante mínimo = 4,0              |                         |

O módulo de riqueza é um parâmetro indicativo na seleção do teor de ligante mínimo para cobrir os granulares e função da espessura do filme de ligante. A mistura asfáltica deve satisfazer parâmetros de compacidade, de resistência à água, de deformação permanente, de módulo complexo e de resistência à fadiga durante o processo de formulação.

Foram adotados teores de 5,1% maiores ao mínimo de 5,07% até 5,9%, com incrementos de 0,2%, para a mistura de módulo elevado. E 4,1% maior ao mínimo de 4% até 4,9, com incrementos de 0,2%, para a mistura *grave-bitume*.

Na Tabela 29 são apresentados os teores de ligante estudados e seu respectivo módulo de riqueza.

**Tabela 29.** Teores de ligante mínimos e teores de ligante adotados.

| Mistura EME 2  |      |      |      |      |      | Mistura GB 3   |      |      |      |      |      |
|--|------|------|------|------|------|--|------|------|------|------|------|
| Módulo de riqueza mínimo (K)= 3,4<br>TLinterno mínimo =5,07% |      |      |      |      |      | Módulo de riqueza mínimo (K)= 2,8<br>TLinterno mínimo =4,00% |      |      |      |      |      |
| K  | 3,42 | 3,56 | 3,7  | 3,84 | 3,99 | K  | 2,87 | 3,02 | 3,17 | 3,32 | 3,46 |
| TLint  | 5,1% | 5,3% | 5,5% | 5,7% | 5,9% | TLint  | 4,1% | 4,3% | 4,5% | 4,7% | 4,9% |

A massa volumétrica determinadas para as misturas *grave-bitume* é apresentado na Tabela 30.

**Tabela 30.** Massa volumétrica da mistura *grave-bitume*.

| Mistura | MVRc (g/cm <sup>3</sup> ) | MVR (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|---------------------------|--------------------------|
| 4,1%    | 2,564                     | 2,549                    |
| 4,3%    | 2,556                     | 2,537                    |
| 4,5%    | 2,548                     | 2,528                    |
| 4,7%    | 2,539                     | 2,524                    |
| 4,9%    | 2,532                     | 2,519                    |

De igual maneira a massa volumétrica determinada para a mistura de módulo elevado é apresentado na Tabela 31.

**Tabela 31.** Massa volumétrica da mistura de módulo elevado.

| Mistura | MVRc (g/cm <sup>3</sup> ) | MVR (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------|---------------------------|--------------------------|
| 5,1%    | 2,529                     | 2,517                    |
| 5,3%    | 2,521                     | 2,507                    |
| 5,5%    | 2,513                     | 2,501                    |
| 5,7%    | 2,506                     | 2,496                    |
| 5,9%    | 2,498                     | 2,492                    |

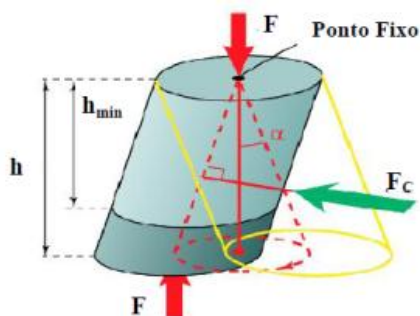


## 4.6 ENSAIOS LABORATORIAIS

Neste item são apresentados os procedimentos da sequência de ensaios realizados conforme a metodologia de formulação de misturas francesas realizados na pesquisa.

### 4.6.1 Compactação por cisalhamento giratório (NF P 98-252).

O princípio do ensaio de compactação por cisalhamento giratório consiste na aplicação de uma carga estática, e mediante cisalhamento giratório a uma inclinação estabelecida produzir a compactação do corpo-de-prova. O volume de vazios é calculado a partir da altura do corpo-de-prova para determinado números de giros até atingir a altura mínima correspondente a 0% de vazios (Figura 58).



**Figura 58.** Ensaio de compactação por cisalhamento giratório.

- $h_{min}$  = Altura mínima para 0% de vazios;
- $h$  = altura aparente para N giros;
- $F$  = Força axial;
- $F_c$  = Força de cisalhamento;
- $\alpha$  = ângulo de inclinação.

O ensaio de compactação por cisalhamento giratório é sensível a fatores de formulação tais como o atrito do esqueleto granular, o teor de ligante, a forma dos granulares, a angularidade do esqueleto granular, o tamanho máximo e a curva granulométrica. A partir deste ensaio, o risco de deformação permanente pode ser detectado, tendo a possibilidade de variar alternativas de composição até atingir as propriedades volumétricas do material requerido.

O ensaio serve para verificar a consistência das fórmulas e pode-se aplicar a todos os tipos de misturas, devendo cumprir uma percentagem de vazios para um determinado número de giros estabelecidos nas especificações. Este ensaio proporciona suficientes elementos para a seleção da curva granulométrica e do teor de ligante. É realizado sobre certa composição e interpretado isoladamente ou sobre uma série de experiências de duas ou três diferentes composições granulométricas (LCPC, 2007). Os principais parâmetros para a interpretação são:

- Percentagem de vazios em função do número de giros;
- Percentagem de vazios em um dado número de giros;
- Percentagem de vazios a 10 giros;
- Percentagem de vazios para 1 giro;
- Inclinação K, da curva de compactação.

A evolução da compactação por cisalhamento giratório pode ser acompanhada desenhando em escala semi-logarítmica a evolução do volume de vazios com o número de giros (MOUTIER, 1977).

O estudo da evolução do volume de vazios com base no número de giros e número de passagem de um compactador mostra curvas semelhantes e lineares. Experiências têm mostrado que há uma relação entre o número de giros no ensaio de compactação por cisalhamento giratório e a espessura da camada em campo (LCPC, 2007; MOUTIER, 1997).

A percentagem de vazios nos dez giros representa o estado do material com pouco consumo de energia. Uma mistura para o qual esta energia leva a uma baixa percentagem de vazios com uma trabalhabilidade excessiva pode apresentar problemas de deformação permanente. É provável que este resultado seja devido ao baixo atrito interno do esqueleto granular com baixo potencial de resistência a deformação permanente.

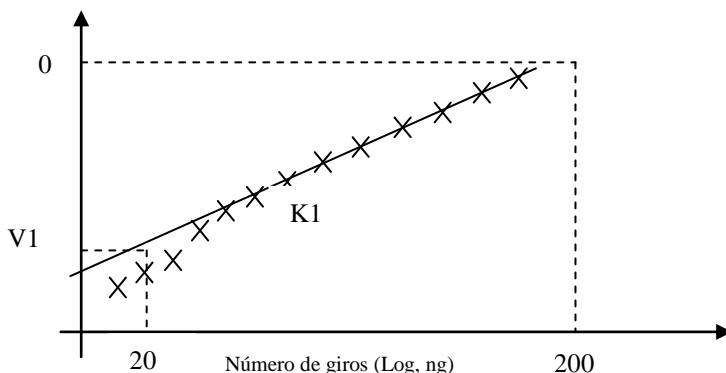
A percentagem de vazios a um giro é outra ferramenta para interpretar os resultados do ensaio. Para o modelo é realizado uma linha de regressão para os pontos  $v$  versus  $\ln(\text{ng})$  ou  $C$  versus  $\ln(\text{ng})$  entre 20 e 200 giros,  $v\%$  é calculado considerando que a compactação no ensaio é linear com o eixo logarítmico de número de giros.

$$v\% = v_1 - K_1 \cdot \ln(\text{ng}) \quad (72)$$

$$C\% = C_1 - K_1 \cdot \ln(ng) \quad (73)$$

Onde:

- v% = volume de vazios;
- v1 = volume de vazios no primeiro giro;
- K1 = inclinação da curva;
- C = compacidade;
- C1 = compacidade no primeiro giro;
- ng = número de giros.



**Figura 59.** Modelo e cálculo do valor de K1 (LCP, 2007).

A inclinação (K1) no modelo é uma indicação da trabalhabilidade da mistura. Seu valor está relacionado com o diâmetro máximo da curva granulométrica. Quando o teor de ligante varia, K1 permanece constante para uma determinada curva granulométrica.

Os ensaios de compactação por cisalhamento giratório foram realizados no laboratório de pavimentação da Escola Politécnica de São Paulo (EPUSP). Os ensaios foram realizados conforme o procedimento normativo NF P 98-252. A massa dos corpos de prova foi determinada em função da altura mínima para atingir 0%, fixada em 150mm e a massa volumétrica real das misturas (equação 74).

$$M = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot h_{\min} \cdot MVR \quad (74)$$

Onde:

- M = Massa do corpo de prova;
- d = Diâmetro interno do molde 150mm;
- MVR = Massa volumétrica real da mistura correspondente a 0% vazios;
- $h_{\min}$  = Altura mínima estabelecida por norma 150mm.

As misturas foram usinadas e ensaiadas à temperatura estabelecida segundo a curva de viscosidade dos ligantes, separadamente para cada corpo de prova e colocados em estufa por um período de duas horas (Figura 60).



**Figura 60.** Ensaio de compactação por cisalhamento giratório (a) PCG3 (b) preparação da mistura (c) e (d) colocação da mistura dentro do molde (e) corpo-de-prova na prensa (f) desmoldagem.

A carga vertical aplicada foi de 11700N, estando compreendida entre 10000N e 12000N estabelecido por norma para diâmetro de 150 mm, resultando em uma tensão vertical de 662kPa. A velocidade de rotação esteve em 30 giros/min e ângulo de  $0^{\circ}55'$ .

Uma vez colocada a mistura no molde esta deve permanecer na estufa por um período de 2 horas em repouso. Após este período, é colocada na PCG e aplicada uma pré-compactação com uma carga entre 150N a 3000N sem rotação. O sistema de aquisição da máquina registra leituras da altura do corpo de prova com precisão  $\pm 0,2\text{mm}$ , medida em 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150 e 200 Giros.

O cálculo do volume de vazios é função das alturas do corpo-de-prova, e está diretamente relacionado às massas volumétricas reais e aparentes pelas medidas geométricas do corpo de prova (equação 75).

$$v\% = 100 \cdot ((h_{ng} - h_{min}) / h_{ng}) \quad (75)$$

Onde:

$v\%$  = volume de vazios;

$h_{ng}$  = altura aparente para n giros;

$h_{min}$  = altura mínima para 0% de vazios.

#### 4.6.2 Sensibilidade a água no ensaio Duriez (NF P 98-251-1)

O ensaio Duriez permite avaliar a perda de resistência devido à ação da água mediante a ruptura a compressão direta de 10 ou 12 corpos de prova selecionados em função do diâmetro máximo nominal D. A norma estabelece duas condições de ensaio em função do tamanho máximo nominal (Tabela 32).

**Tabela 32.** Condições de ensaio Duriez em função do diâmetro D.

| Diâmetro       | Diâmetro do molde (mm)                   | Altura molde (mm) | Diâmetro êmbolos | No CP | Massa do CP     | Carga de Compactação |
|----------------|--|-------------------|------------------|-------|-----------------|----------------------|
| D < 14 mm      | 80 mm - 0.1 mm<br>Ou<br>80 mm + 0.3 mm   | 190 mm            | 79.75 mm         | 12    | 1000 $\pm$ 2 gr | 60 Kn $\pm$ 0.5%     |
| D $\geq$ 14 mm | 120 mm - 0.1 mm<br>Ou<br>120 mm + 0.3 mm | 270 mm            | 119.75 mm        | 10    | 3500 $\pm$ 4 gr | 180 Kn $\pm$ 0.5%    |

A prensa utilizada para a realização dos ensaios foi uma prensa tipo Universal, disponível no laboratório de materiais e construção da

Universidade Federal de Santa Catarina. A velocidade de avanço da prensa foi verificada e calibrada garantindo uma velocidade de avanço  $1\text{mm/s} \pm 1\%$  de precisão. Para a calibração foi utilizado um sistema de aquisição de dados tipo spaid8, e um transdutor de deslocamento tipo WI, sendo necessário realizar várias medições até conseguir a velocidade desejada, que foi mantida para todos os ensaios (Figura 61).



**Figura 61.** Verificação e calibração da velocidade de avanço da prensa.

Foram utilizados moldes de 80mm de diâmetro, sendo a massa do corpo de prova 1000gr, por ser o diâmetro máximo nominal inferior a 14mm. Os materiais foram usinados no laboratório de pavimentação à temperatura estabelecida de acordo com a curva de viscosidade dos ligantes para os dois tipos de misturas.

Após as misturas asfálticas permanecerem por um período de duas horas em estufa, foram compactadas mediante a aplicação de uma carga de 60kN a duplo pistão. A carga foi aplicada a uma velocidade de 1 mm/s, a carga máxima de 60kN atingida para todas as misturas em 30s aproximadamente, sendo inferior ao parâmetro estabelecido pela norma de no máximo 60s. Esta carga foi mantida por um período de 5 minutos  $\pm 5$  s (Figura 62).



**Figura 62.** Sequência da compactação no ensaio duriez (a) usinagem (b) tempo de repouso em estufa duas horas (c) compactação (d) detalhe da compactação.

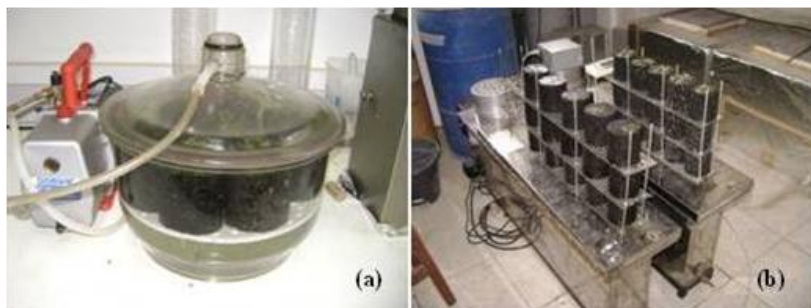
Retirada a carga, foi esperado um período de 4 horas para a desmoldagem dos corpos de prova. Os corpos de prova permaneceram em repouso durante 24 horas a temperatura ambiente ( $15^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ ). Foram medidos os pesos e alturas com uma precisão de 1g e 0.1mm respectivamente. Calculou-se a massa volumétrica aparente pelas medidas geométrica para cada conjunto de corpo de prova (MVA), rejeitando os corpos de prova que se afastarem da media do lote em 1%.

A partir das MVA o conjunto de doze corpos-de-prova foram divididos em 3 grupos homogêneos conservando cinco à temperatura de  $18 \pm 1^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de  $50 \pm 10\%$  (sem imersão), cinco condicionados na água a  $18 \pm 1^{\circ}\text{C}$  (sob imersão) durante 7 dias e 2 utilizados para a determinação da massa volumétrica aparente mediante passagem hidrostática (MVA).

Os corpos-de-prova condicionados na água primeiramente passaram por um processo de limpeza e desobstrução dos vazios. Este procedimento consistiu na limpeza superficial mediante uma lavagem rápida e aplicação de uma pressão residual de  $47\text{kPa} \pm 5\%$ , durante  $1\text{h} \pm$



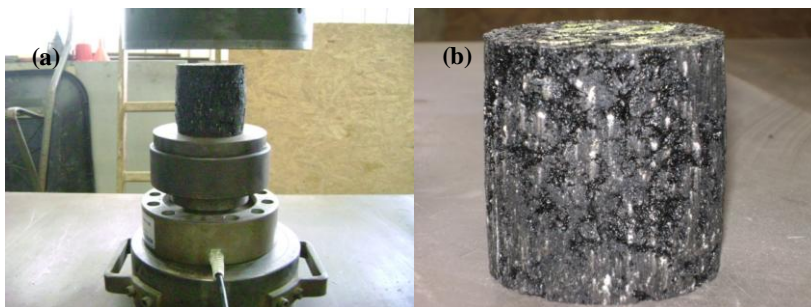
5min. Após este processo, foi colocada água no recipiente, mantendo a pressão residual de  $47\text{kPa} \pm 5\%$  durante duas horas (Figura 63).



**Figura 63.** Condicionamento e ruptura dos corpos de prova Duriez (a) aplicação de vácuo (b) condicionamento com imersão e sem imersão.

Ao final da aplicação do vácuo, os corpos de prova foram secados superficialmente, pesados e colocados em sob imersão por um período de 7 dias.

A ruptura dos corpos de prova foi realizada a uma velocidade de  $1\text{mm/s}$  de avanço da mesa, registrando o valores de  $R$  como a resistência média dos corpos-de-prova sem imersão e  $r$  como a resistência media dos corpos de prova sob imersão. A relação destes dois valores representa a perda de resistência medida no ensaio pela ação da água, na Figura 64 é apresentada a ruptura dos corpos-de-prova.



**Figura 64.** Ruptura dos corpos de prova Duriez (a) ruptura do corpo de prova (b) corpos de prova após a ruptura.



#### 4.6.3 Ensaio de deformação permanente NF P 98-253-1

O ensaio de deformação permanente tem suas diretrizes de execução estabelecidas pela norma francesa NF P 98-250-2. Previamente devem ser compactadas placas de dimensões 18cmx50mx5cm ou 18cmx50mx10cm, dependendo da espessura de utilização da mistura em campo. As misturas foram preparadas à temperatura de referência sendo necessários 22,8kg de material aproximadamente.

Para a preparação e compactação das placas foi seguido o procedimento normativo NF P 98-250-2 (*Preparation des mélanges hydrocarbonés*). O cálculo do volume de material necessário foi determinado em função do volume de vazios e da massa volumétrica real (equação 76).

$$M = L.l.e.MVR (100-v\%) \quad (76)$$

Onde:

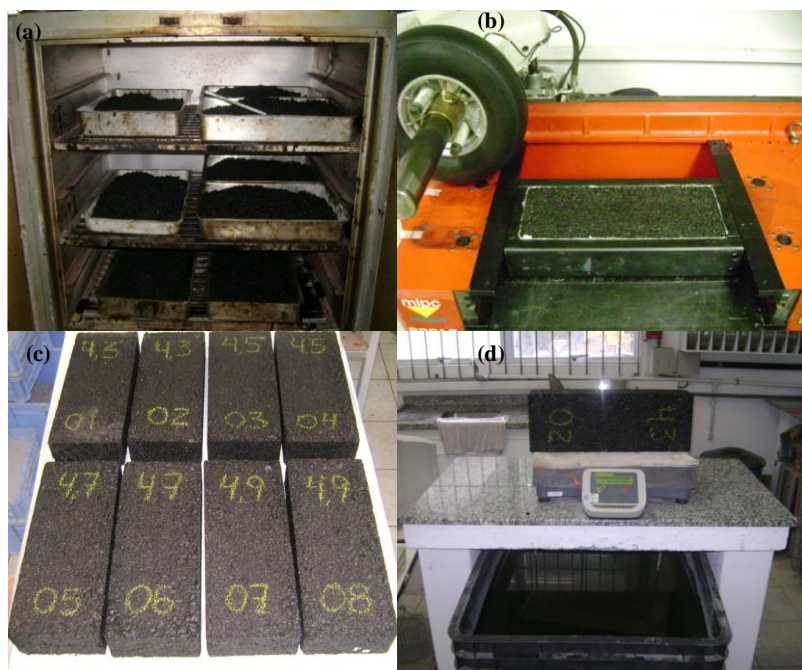
L = comprimento cm;  
l = largura cm;  
e = espessura da placa cm;  
v% = volume de vazios.

Devido às limitações de equipamento para misturar 22,8kg, foi dividido o processo de mistura para cada placa em duas etapas, os materiais foram aquecidos separadamente, antes da compactação a mistura foi homogeneizada manualmente dentro de um molde de maior capacidade. A seqüência de preparação das misturas asfálticas e ilustrada na (Figura 65).



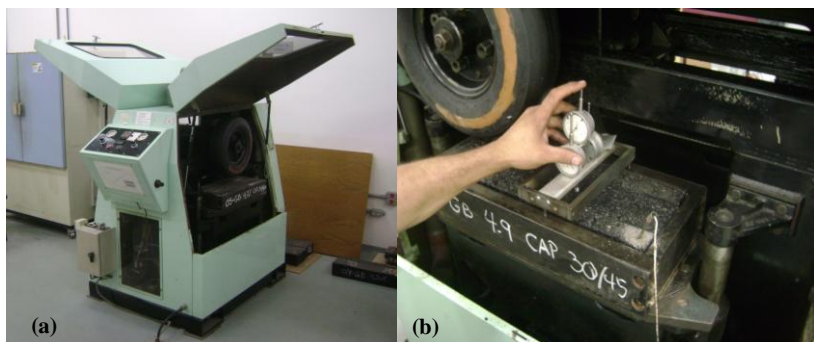
**Figura 65.** Processo mistura (a) aquecimento dos granulares materiais fino à esquerda e material grosso à direita (b) processo de mistura.

Nesta pesquisa foram compactadas para cada mistura oito placas, duas por cada teor de ligante de dimensões 18cmx50cmx10cm (Figura 66).



**Figura 66.** Preparação das placas (a) repouso após da usinagem (b) compactação (c) placas para os teores de 4.3% até 4.9 (d) pesagem hidrostática das placas.

O ensaio consistiu em determinar em laboratório o potencial de afundamento de trilha de roda das misturas asfálticas formuladas com a passagem repetida de um pneumático sobre uma placa de concreto asfáltico, aplicando uma pressão vertical igual a  $5000\text{N} \pm 50\text{N}$ , provocando a diminuição relativa da espessura em condições de temperatura controlada de  $60^\circ\text{C}$  (Figura 67).



**Figura 67.** Ensaio de deformação permanente (a) placa condicionada para o ensaio (b) medida da profundidade de deformação.

Na realização de cada ensaio, um par de placas com igual teor de ligante foram acondicionadas e ensaiadas a uma temperatura controlada de 60°C. Com um sensor de temperatura colocado em uma das placas, a pressão de inflado durante a realização do ensaio manteve-se em 6bar, calibrado ao começo do ensaio, e a frequência do ensaio foi de 1Hz, com aplicação da carga vertical de 5000N.

Foram realizadas leituras iniciais a 0, 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos da superfície da placa, em 15 pontos distribuídos. O cálculo da profundidade da deformação permanente para cada placa é calculada pela média das profundidades medidas nos 15 pontos sobre a superfície da placa de espessura igual a 10cm (equação 77).

$$P_i \% = \frac{\sum j(m_j - m_0)}{15.E} \quad (77)$$

Onde:

E = espessura da placa (mm);

$m_j$  = medida da profundidade a determinado número de ciclos;

$m_0$  = Valor inicial de profundidade, valor de referência mm.

Traça-se a curva da evolução da profundidade de afundamento em função do número de ciclos desenhados em escala logarítmica a relação entre a profundidade e o número de ciclos, representada pela equação 78.

$$Y = A \left( \frac{N}{1000} \right)^b \quad (78)$$

Onde:

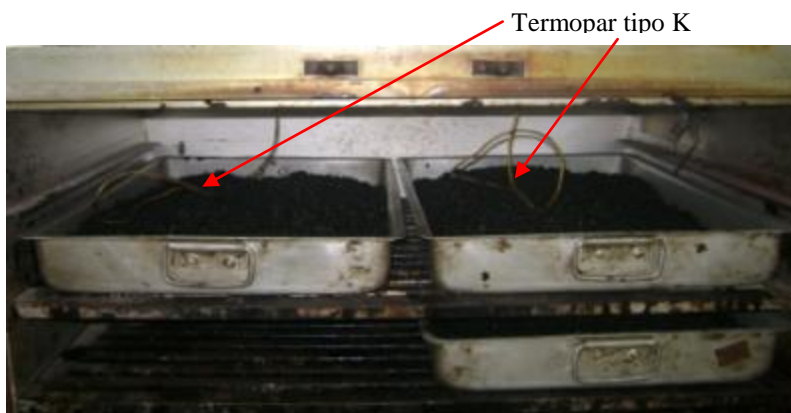
- Y = profundidade de afundamento a N ciclos;
- A = profundidade de afundamento a 1000 ciclos;
- b = inclinação da curva em coordenadas logarítmicas.

#### **4.6.4 Preparação dos corpos-de-prova para o ensaio de módulo complexo e resistência a fadiga**

Os ensaios de módulo complexo e resistência à fadiga são realizados a partir de copos-de-prova trapezoidais obtidos de placas moldadas em laboratório ou extraídas de campo. É necessário um procedimento rigoroso na preparação dos materiais, na compactação e no processo de corte das placas para obter corpos-de-prova que sejam os mais homogêneos possíveis, tanto no volume de vazios e quanto as suas dimensões.

Foram preparadas duas placas para cada mistura de dimensões 40cmx60cmx12cm. Para cada placa foi calculado o material em função da massa volumétrica real da mistura, das dimensões do molde, da espessura da placa e da percentagem de vazios compactados v% (equação 76).

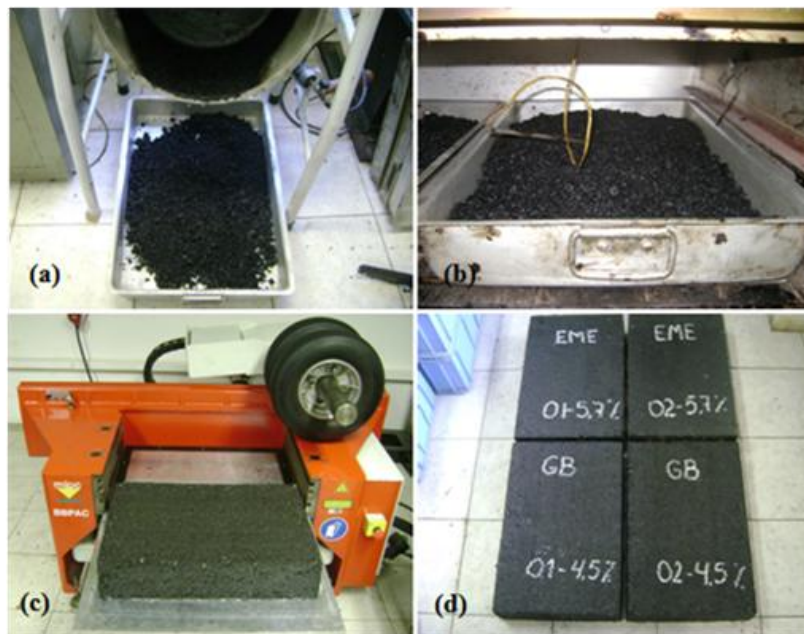
Os materiais foram aquecidos separadamente e colocados em estufa por um período no mínimo de duas horas a temperatura de referência. Após este período, foram misturados com ajuda de um misturador mecânico industrial adaptado para este propósito, sendo necessário dividir o material em seis partes pela capacidade do misturador. Após este processo, as misturas foram colocadas em estufa, permanecendo em repouso durante um período de duas horas, monitorando a temperatura com termopar tipo K ligado a um sistema de aquisição de dados (Figura 68).



**Figura 68.** Material para uma placa de 40cmx60cmx12cm.

O processo de compactação das placas segue os parâmetros da norma NF P P8-250-2 (*Preparation des mélanges hydrocarbonés – Compactage des plaques*). A massa de mistura asfáltica é homogeneizada antes da compactação, dentro de um molde retangular. Após este processo, é compactada aplicando uma carga com dois pneumáticos com eixo livre ou bloqueado. Segundo o processo de compactação, as rodas executam as passadas a velocidade constante paralelamente ao eixo da placa. Durante a compactação, a superfície da placa é mantida um pouco acima da borda superior do molde, permitindo compensar a redução de vazios resultantes.

Na Figura 69, é ilustrado o processo da seqüência de preparação das placas para ensaios de módulo complexo e resistência à fadiga.



**Figura 69.** (a) mistura (b) mistura em repouso por um período de duas horas (b) mesa compactador (d) placas após a compactação.

A homogeneidade das placas é calculada com base na densidade medida com gamadessimétrico, porém não se dispõe deste equipamento no laboratório de pavimentação.

Foi determinada massa volumétrica aparente por pesagem hidrostática, com o propósito de verificar o volume de vazios da placa de maneira geral. Este processo foi realizado após as placas permanecerem em repouso por um período de 8 dias para garantir a cura do material.

As placas foram serradas com disco diamantado obedecendo a um processo rigoroso previsto na norma NF P98-250-3 (*Préparation des mélanges hydrocarbonés – Confection d'éprouvettes dans un bloc de mélange hydrocarboné*) os corpos-de-prova são obtidos do centro da placa, sendo a base maior do corpo de prova orientado para o centro e o topo do corpo-de-prova para a borda da placa, rejeitando aproximadamente os primeiros 5cm do contorno da placa, Na Figura 70, é ilustrado o processo de corte das placas.





**Figura 70.** (a) corte transversal (b) corte no borde e no centro, comprimento  $250\text{mm} \pm 1\text{mm}$  (c) corte longitudinal em laminas de espessura  $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$  (d) placas para cada corpo-de-prova.

Cada corpo-de-prova é serrado em formato trapezoidal com dimensões segundo a (Tabela 33).

**Tabela 33.** Dimensões dos corpos de prova para o ensaio de módulo complexo e resistência à fadiga.

| Dimensões do corpo-de-prova | $D < 14\text{mm}$        | $14\text{mm} < D < 20\text{mm}$ | $20\text{mm} < D \leq 40\text{mm}$ |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------------------------|
| B                           | $(56 \pm 1) \text{ mm}$  | $(70 \pm 1) \text{ mm}$         | $(70 \pm 1) \text{ mm}$            |
| b                           | $(25 \pm 1) \text{ mm}$  | $(25 \pm 1) \text{ mm}$         | $(25 \pm 1) \text{ mm}$            |
| e                           | $(25 \pm 1) \text{ mm}$  | $(25 \pm 1) \text{ mm}$         | $(50 \pm 1) \text{ mm}$            |
| h                           | $(250 \pm 1) \text{ mm}$ | $(250 \pm 1) \text{ mm}$        | $(250 \pm 1) \text{ mm}$           |

A Figura 71, ilustra as lâminas cortadas do conjunto de duas placas. Estas são posicionadas e cortadas em conjunto de quatro placas em formato trapezoidal.



**Figura 71.** Conjunto de lâminas cortadas.

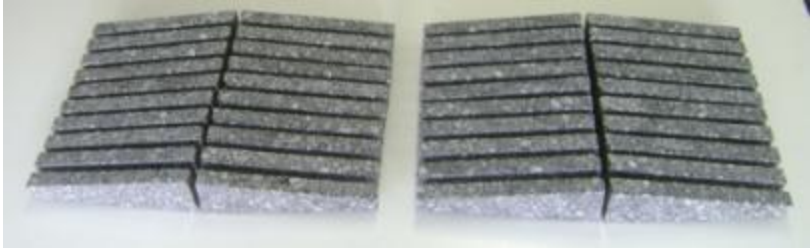
O posicionamento é realizado com ajuda de elementos cilíndricos de aço com as medidas necessárias para ter as dimensões dos corpos-de-prova base maior ( $70 \pm 1$ ) mm, base menor ( $25 \pm 1$ ) mm, espessura ( $25 \pm 1$ ) mm, comprimento ( $250 \pm 1$ ) mm (Figura 72).



**Figura 72.** Corte dos corpos de prova trapezoidais.



Para cada mistura são obtidos 40 corpos-de-prova. De cada placa obteve-se 20 corpos-de-prova. Na Figura 73, são ilustrados os corpos-de-prova obtidos das duas placas da mistura de módulo elevado.



**Figura 73.** Conjunto de 20 corpos-de-prova por placa da mistura de módulo elevado.

Estes corpos-de-prova passaram por uma triagem em função das dimensões e do volume de vazios, tanto para o ensaio de módulo complexo como para o ensaio de fadiga determinando, os parâmetros  $K_\sigma$  e  $K_\varepsilon$  a partir da equação 79 e equação 80.

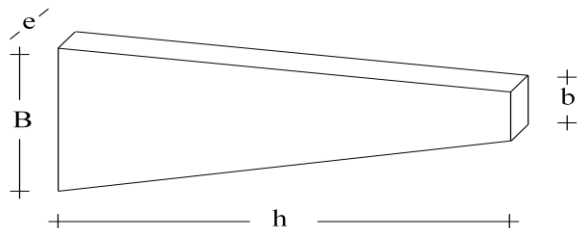
$$K_\sigma = \frac{3h}{2eb(B-b)} \quad (79)$$

$$K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{Z} = \frac{(B-b)^2}{8.b.h^2 \left[ \frac{(b-B)(3B-b)}{2B^2} + \ln \frac{B}{b} \right]} \quad (80)$$

Onde:

- $K_\varepsilon$  = coeficientes função das dimensões,  $\text{mm}^{-1}$ ;
- $K_\sigma$  = coeficientes função das dimensões,  $\text{mm}^{-2}$ ;
- h = altura do corpo de prova (mm);
- e = espessura do corpo de prova (mm);
- B = base maior do corpo de prova (mm);
- b = base menor do corpo de prova (mm).

Na Figura 74, é ilustrada a geometria do corpo-de-prova base maior (B) ( $70 \pm 1$ ) mm, base menor (b) ( $25 \pm 1$ ) mm, espessura (e) ( $25 \pm 1$ ) mm, comprimento (h) ( $250 \pm 1$ ) mm.



**Figura 74.** Dimensões do corpo-de-prova.

Para a mistura *grave-bitume* igualmente foram obtidos 20 corpos-de-prova por cada placa, sendo um total de 40 corpos-de-prova. Na

Figura 75 são comparados os corpos-de-prova tipo, para cada classe de mistura asfáltica.



**Figura 75.** (a) esquerda corpo-de-prova tipo da mistura *grave-bitume* (b) direita corpo-de-prova da mistura de módulo elevado.

Os corpos-de-prova permaneceram armazenados à temperatura ambiente inferior a 30°C, durante um período de 15 dias para a cura do material. Após este período, foi realizada a triagem e peso dos corpos de prova.

Para o conjunto de corpos-de-prova selecionados deve-se cumprir duas condições: o desvio padrão do volume de vazios deve ser inferior a 0,5%, e o coeficiente de variação do parâmetro  $K_e$ , inferior a 1%.

Os corpos-de-prova são agrupados em lotes de quatro corpos-de-prova na ordem ascendente do  $K_e$ . Os ensaios, tanto para módulo complexo como para fadiga, são realizados para quatro corpos-de-prova simultaneamente onde o valor de deformação calculado é o mesmo para cada par colocado em cada excêntrico.

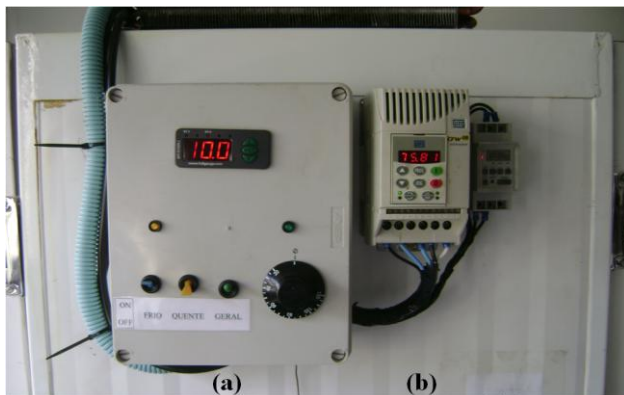
#### 4.6.5 Módulo complexo

O ensaio de módulo complexo é realizado conforme os parâmetros da norma francesa NF P 98-260-2. Este ensaio é realizado mediante a solicitação em flexão alternada em dois pontos em modo contínuo, a amplitude de deslocamento controlada em condições de temperatura e frequência variada. A Figura 76 ilustra a máquina para a realização do ensaio de módulo complexo.



**Figura 76.** Máquina de módulo complexo e resistência a fadiga.

A máquina consta de um sistema de refrigeração e aquecimento, ao mesmo tempo em que permite a realização do ensaio desde  $-10^{\circ}\text{C}$  até  $40^{\circ}\text{C}$ , variando a frequência de 1Hz até 30Hz (Figura 77).



**Figura 77.** (a) Controle de temperatura (b) controle de frequência.

A aferição da amplitude do deslocamento imposto é realizada através do excêntrico. O deslocamento imposto deve ser no domínio das pequenas deformações, inferior a  $50 \mu\text{def}$ . O valor da flecha necessária para produzir a deformação correspondente no corpo-de-prova é calculada em função da deformação máxima fixada (equação 81).

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{Z} = \frac{(B-b)^2}{8.b.h^2 \left[ \frac{(b-B)(3B-b)}{2B^2} + \ln \frac{B}{b} \right]} \quad (81)$$

Onde:

$Z$  = flecha necessária para produzir a deformação requerida  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ ;

$\varepsilon_{m\acute{a}x}$  = deformação escolhida para realização do ensaio ( $< 50 \times 10^{-6}$ );

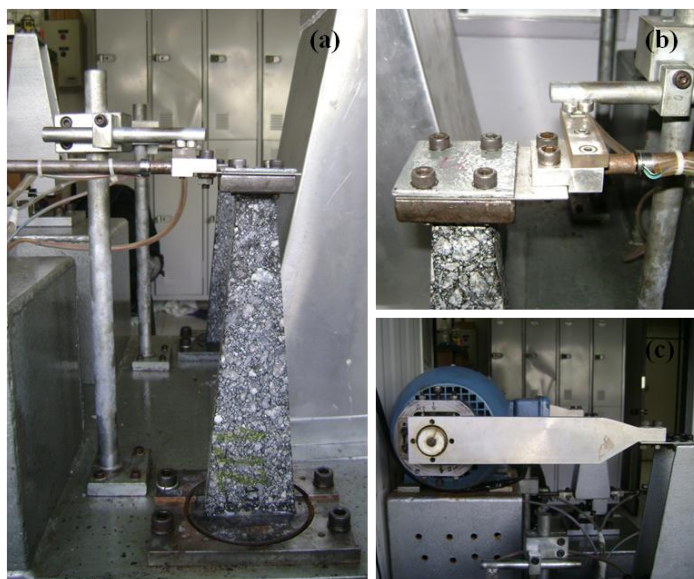
$K_{\varepsilon}$  = coeficiente relacionado às dimensões do corpo de prova, em  $\text{mm}^{-1}$ ;

Após a serragem e permanecer em repouso por o período de 15 dias, os corpos-de-prova são colados à chapa metálica com adesivo tipo Araldite, repousando um período de 24 horas, garantindo a cura da cola (Figura 78).



**Figura 78.** Colagem dos corpos-de-prova com adesivo Araldite.

A chapa metálica junto com o corpo-de-prova é parafusada na máquina aferindo o deslocamento necessário no topo do corpo-de-prova para produzir a deformação correspondente ao ensaio, regulando a amplitude do deslocamento através dos excêntricos (Figura 79).



**Figura 79.** (a) corpo-de-prova parafusado no topo e na base (a) célula de carga e sensor de Hall de deslocamento (c) excêntrico da máquina.

O conjunto de quatro corpos-de-prova são instalados na máquina conforme a Figura 80 e mantida sob condicionamento de temperatura de ensaio. As medidas de módulo são realizadas aos  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $15^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $30^{\circ}\text{C}$ ,  $40^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$  e para as frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz.



**Figura 80.** Corpos-de-prova colocados na máquina de módulo e fadiga.

Na realização do ensaio parte-se da temperatura de  $-10^{\circ}\text{C}$ . Os corpos-de-prova permanecem nesta temperatura por um período de 6 horas. Após este período, são realizadas leituras de amplitude da força, amplitude de deslocamento e ângulo de fase, mudando a frequência no inversor de frequência que liga ao motor da máquina em 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz. Para cada temperatura é realizada este procedimento. Uma vez concluída as leituras correspondente a  $-10^{\circ}\text{C}$ , muda-se a temperatura para  $0^{\circ}\text{C}$ , esperando um intervalo de quatro horas para condicionamento dos corpos-de-prova realizando leituras para as frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz.

Deve-se levar em conta a inércia da parte móvel, tanto do corpo de prova como do equipamento, de maneira geral, para os ensaios a partir de sinais de forças e deslocamento sinusoidais aplicados ao corpo-

de-prova, a defasagem entre os dois sinais calcula-se o módulo complexo com ajuda de dois fatores (BAAJ, 2002).

Um fator de forma  $\gamma$  dependente das dimensões do corpo-de-prova e um fator massa  $\mu$  levando em conta o efeito da inércia ligado à massa  $M$  do corpo-de-prova em movimento e à massa do equipamento móvel (BAAJ, 2002; HUET, 1963).

$$\gamma = \frac{12 h^3}{e (B-b)^3} \left[ \left( 2 - \frac{b}{2B} \right) \frac{b}{B} - \frac{3}{2} - \ln \left( \frac{b}{B} \right) \right] \quad (82)$$

$$E^* = \frac{\sigma^*}{\varepsilon^*} \quad (83)$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (84)$$

$$\varphi = \text{atan} \frac{E_2}{E_1} \quad (85)$$

$$E_1 = \gamma \left[ \frac{F_0}{Z_0} \cos \varphi + \frac{\mu M + m}{1000} \omega^2 \right] \quad (86)$$

$$E_2 = \gamma \frac{F_0}{Z_0} \text{sen } \varphi \quad (87)$$

Onde:

$E^*$  = Módulo complexo (MPa);

$Z$  = Flecha no teto do corpo-de-prova  $Z = Z_0 \text{Sen} \omega t$ , (mm);

$Z_0$  = Amplitude da medida do deslocamento sinusoidal imposto no corpo de prova (mm);

$\varphi$  = Ângulo de defasagem entre a força e a deformação ( $^\circ$ );

$E_1$  = Parte real do módulo (MPa);

$E_2$  = Parte imaginaria do módulo (MPa);

$b$  = Base menor do corpo-de-prova (mm);

$B$  = Base maior do corpo-de-prova (mm);

$H$  = Altura do corpo-de-prova (mm);

$\gamma$  = Fator de forma  $\text{mm}^{-1}$ ;

$M$  = Massa do corpo de prova (kg);

$M$  = Massa do equipamento móvel (kg);

$F_0$  = Amplitude da força aplicada no teto do corpo-de-prova;

$\omega$  = Pulsção (rad/s),  $\omega = 2\pi f$ .

#### 4.6.6 Ensaio de fadiga

Uma das alternativas para realizar o ensaio de fadiga das misturas asfálticas é sob flexão alternada no domínio frequencial. Destaca-se que é o método que tem mais proximidade com as solicitações que ocorrem no campo. O ensaio é realizado sob os critérios normativos (NF P 98-261-1, 1993). Geralmente é realizado para três níveis de deformação, de maneira que 1/3 dos corpos de prova rompam acima de um milhão de solicitações. Estes níveis dependem do tipo de mistura que se está avaliando.

O ensaio é realizado a uma frequência de 25Hz e temperatura de 10°C. Esta temperatura é fixa por norma e teoricamente é a temperatura mais crítica, onde ocorre a maior energia perdida no ensaio de módulo complexo evidenciado no plano Cole-Cole.

Os corpos de prova passam igualmente por um processo de triagem em função das dimensões  $K\epsilon$  e volume de vazios  $V_v$ . Ensaando no mínimo 24 corpos-de-prova. Estes são organizados em ordem ascendente do  $K\epsilon$  e divididos em três lotes de 6 corpos-de-prova, sendo testado cada lote num nível de deformação diferente.

Em grupo de quatro corpos-de-prova estes são colados a chapas metálicas, que posteriormente são parafusadas na máquina. Realiza-se a aferição da amplitude de deslocamento corresponde à deformação do ensaio no topo superior do corpo-de-prova. Uma vez concluído, é condicionado à temperatura do ensaio durante no mínimo 6 horas antes do início do ensaio.

Um sistema de aquisição de dados é encarregado de captar os sinais de força da célula de carga com duração de um segundo em intervalos de um minuto. O ensaio conclui quando o valor da força atinge a metade da força inicial do ensaio, sendo registrado o valor do número de ciclos correspondente à ruptura. O resultado é interpretado pela representação em escala logarítmica da deformação *versus* o número de ciclos corresponde a cada corpo-de-prova, indicando o valor da deformação para um milhão de ciclos ( $\epsilon_6$ ), com um grau de confiança de 95%. A deformação para um milhão de ciclos ( $\epsilon_6$ ) é um parâmetro característico em função do tipo material. Tanto a deformação correspondente para um milhão de ciclos, como a inclinação da curva de fadiga, permitem definir a deformação admissível para um número dado de solicitações, que é utilizada para a definição das espessuras das camadas de concreto asfáltico no dimensionamento.



## **5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Os resultados apresentados a seguir correspondem à seqüência de ensaios de preparação de misturas asfálticas em conformidade com as normas francesas. Primeiramente avalia-se a consistência das fórmulas em relação aos parâmetros de compacidade, no ensaio de compactação por cisalhamento giratório (NF P 98-252, 1999) em função das curvas granulométricas e teores de ligantes. Seguidamente avalia-se a sensibilidade a água no ensaio Duriez (NF P 98-251-1, 1995), a deformação permanente (NF P 98-253-1, 1993), o módulo complexo (NF P 98-260-2, 1992) e a resistência em fadiga (NF P 98-261-1, 1993) das misturas asfálticas.

### **5.1 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO POR CISCALHAMENTO GIRATÓRIO (PCG)**

A compacidade das misturas asfálticas foi avaliada para cinco composições, sendo o único parâmetro variável o teor de ligante, mantendo-se constante a granulometria, o tamanho máximo e o teor de finos. Evidenciando a influência do teor de ligante na compacidade da mistura asfáltica.

#### **5.1.1 Mistura de módulo elevado**

O mínimo teor de ligante avaliado correspondeu a 5,1% com módulo de riqueza igual 3,42, superior ao módulo de riqueza mínimo de 3,4 em conformidade da norma NF P 98 – 140. Os teores de ligantes avaliados variaram entre 5,1% a 5,9%, com incrementos de 0,2%. Para cada teor de ligante foram preparados três corpos-de-prova, moldando em total 15 corpos-de-prova (Figura 81).



**Figura 81.** Mistura de módulo elevado, corpos-de-prova moldados.

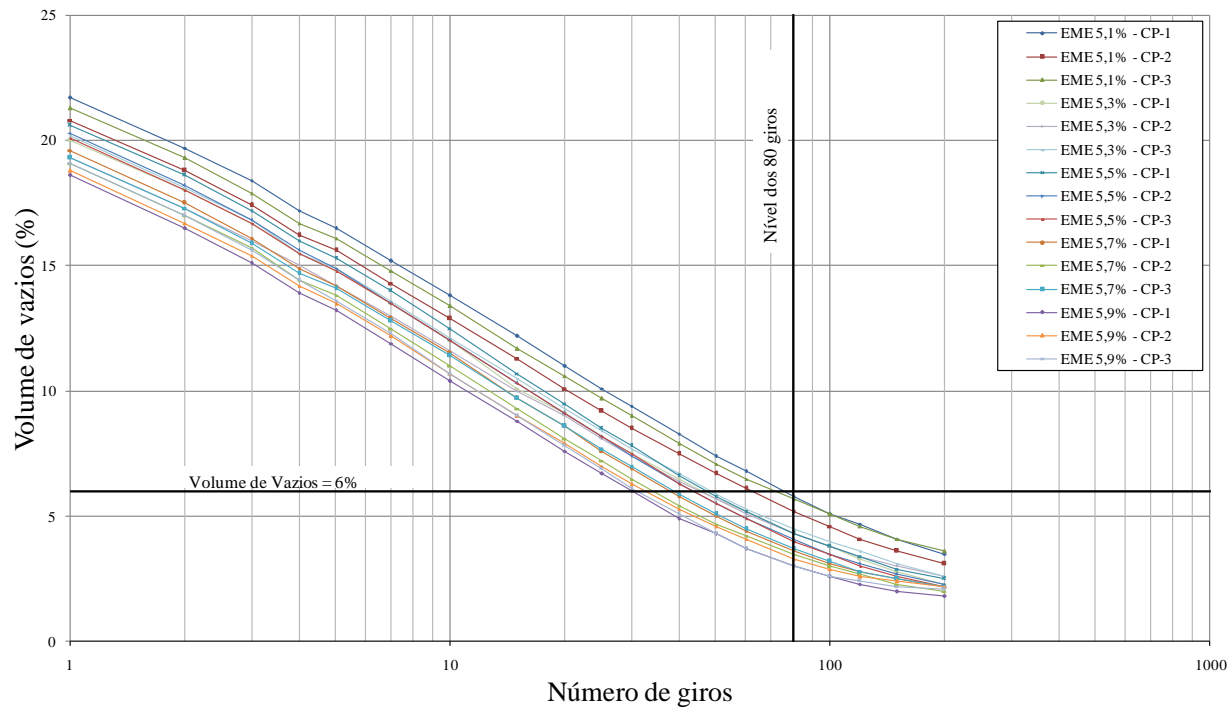
A mistura de módulo elevado com teor de ligante de 5,1% resultou em percentagem de vazios de 5,7% no nível de 80 giros. A mistura com o teor de ligante igual a 5,9% resultou em volume de vazios igual a 3,0%, mostrando excesso de ligante tanto visualmente no corpo de prova como na evolução da curva de compactação. Os teores de ligantes avaliados para a mistura de módulo elevado cumpriram o critério de compacidade no nível dos 80 giros sendo inferior a 6% (Tabela 34).

**Tabela 34.** Volumem de vazios no nível dos 80 giros.

| Teor de Ligante (%) | V1            |               | V10           |               | V80           |               |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                     | média três cp | desvio padrão | média três cp | desvio padrão | média três cp | desvio padrão |
| 5,1                 | 21,3          | 0,5           | 13,4          | 0,5           | 5,7           | 0,3           |
| 5,3                 | 20,0          | 0,5           | 12,0          | 0,3           | 4,3           | 0,1           |
| 5,5                 | 20,3          | 0,3           | 12,0          | 0,3           | 4,1           | 0,2           |
| 5,7                 | 19,3          | 0,3           | 11,4          | 0,3           | 3,6           | 0,1           |
| 5,9                 | 18,8          | 0,3           | 10,7          | 0,2           | 3,0           | 0,2           |

V1, volume de vazios no primeiro giro;  
V10, volume de vazios no nível dos 10 giros;  
V80, volume de vazios no nível dos 80 giros.

Na figura 82, é ilustrada a evolução do volume de vazios com o número de giros.



**Figura 82.** Mistura de módulo elevado, habilidade a compacidade.

Este ensaio permitiu avaliar em função do teor ligante a habilidade com que a mistura aceita compactação. O critério de avaliação das misturas asfálticas de módulo elevado classe 2 correspondeu à percentagem de vazios para o nível dos 80 giros estipulado na norma NF P 98 - 140.

### 5.1.2 Mistura *grave-bitume*

A mistura *grave-bitume* estudada foi definida em conformidade com as diretrizes estabelecidas na norma NF P 98 -138. Em relação ao módulo de riqueza mínimo analisado, este correspondeu a 2,87 para um teor de ligante de 4,1%, superior ao mínimo de 2,8.

Três corpos-de-prova foram preparados para cada teor de ligante. Analisando os teores de ligantes entre 4,1% até 4,9%, com incrementos de 0,2%.

De igual maneira foram moldados 15 corpos-de-prova (Figura 83).



**Figura 83.** Mistura *grave-bitume*, corpos de prova moldados.

A mistura asfáltica com teor de ligante de 4,1% não cumpriu com o critério de compactidade inferior a 10% nos 100 giros. A partir de 4,3% de teor de ligante, os valores de volume de vazios foram satisfatórios, isto é, inferior a 10% no nível dos 100 giros (Tabela 35).

**Tabela 35.** Volume de vazios no nível dos 100 giros.

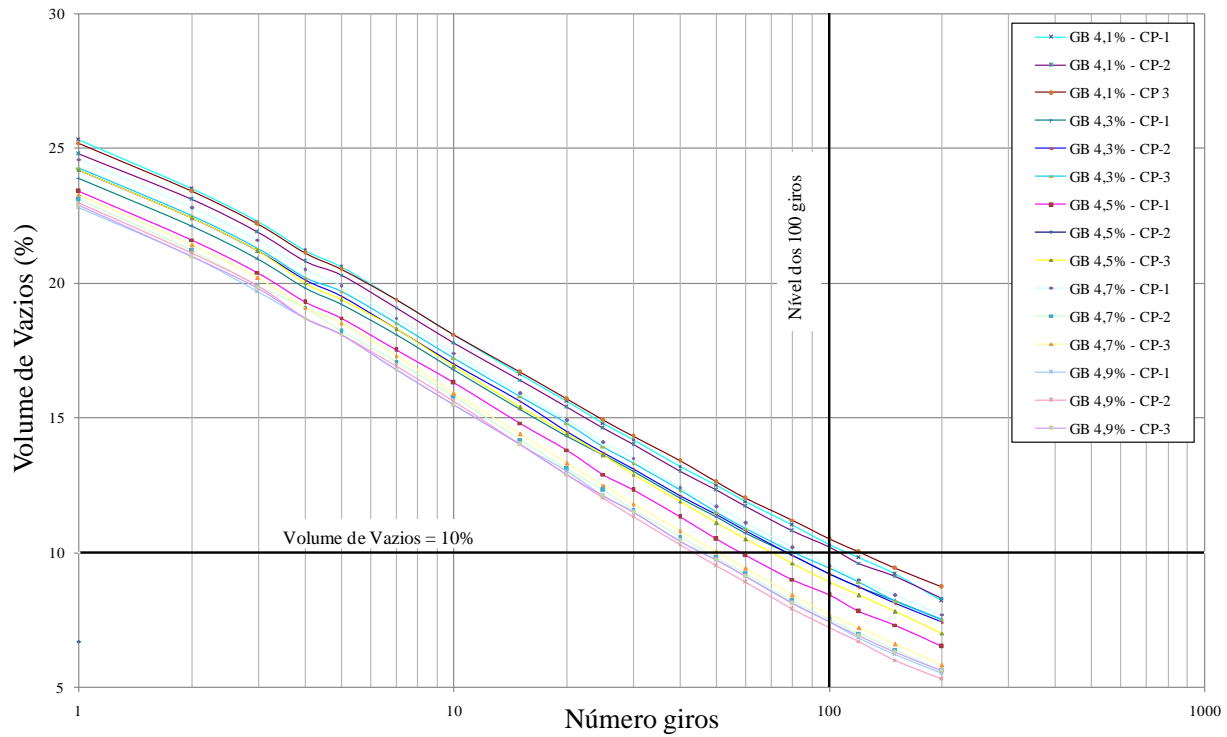
| Teor de Ligante (%) | V1            |               | V10           |               | V100          |               |
|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                     | Média três cp | Desvio padrão | Média três cp | Desvio Padrão | Média três cp | Desvio Padrão |
| 4,1                 | 25,2          | 0,3           | 18,1          | 0,2           | 10,3          | 0,2           |
| 4,3                 | 24,2          | 0,2           | 17,0          | 0,2           | 9,2           | 0,1           |
| 4,5                 | 23,9          | 0,4           | 16,6          | 0,3           | 8,5           | 0,3           |
| 4,7                 | 23,3          | 0,1           | 15,9          | 0,1           | 7,7           | 0,1           |
| 4,9                 | 22,9          | 0,1           | 15,5          | 0,1           | 7,4           | 0,1           |

V1, volume de vazios no primeiro giro;

V10, volume de vazios no nível dos 10 giros;

V100, volume de vazios no nível dos 100 giros.

A Figura 84, ilustra a evolução do volume de vazios com o número de giros para todos os corpos-de-prova estudados.



**Figura 84.** Mistura grave-bitume, habilidade a compacidade.

O ensaio permitiu avaliar a compacidade com o número de giros, considerando o parâmetro de avaliação o volume de vazios no nível dos 100 giros, sendo satisfatórios para os teores de ligante acima de 4,3%, em conformidade com a norma NF P 98 – 138.

## **5.2 ENSAIO DURIEZ**

A sensibilidade à água das misturas asfálticas foi verificada no ensaio Duriez sob imersão e compressão simples. Estes ensaios foram realizados para as composições que cumpriram o critério de compacidade no ensaio de compactação por cisalhamento giratório no nível de giros respectivo.

Em seguida, com a sequência de formulação de misturas asfálticas proposta para atingir os objetivos da pesquisa, as misturas foram preparadas em conformidade com o procedimento normativo NF P 98-251-1, 1995. Foram preparados 12 corpos-de-prova para cada teor de ligante com massa a igual a 1000gr, usinando-os à temperatura especificada. Os corpos-de-prova foram moldados a duplo pistão em moldes de 80mm de diâmetro, por pressão estática de 60kN. Após permanecerem quatro horas de repouso foram desmoldados e divididos em três lotes homogêneos em função da massa volumétrica aparente dos quais cinco foram condicionados durante 7 dias a seco a temperatura de 18°C e umidade relativa de 50%, cinco submersos na água a temperatura de 18°C e dois destinados para a determinação das massa volumétrica aparente por pesagem hidrostática.

Os resultados mostraram para as composições ensaiadas valores satisfatórios, tanto para a mistura de módulo elevado como para a mistura *grave-bitume*.

### **5.2.1 Mistura de módulo elevado**

As composições com teores de ligante de 5,1% até 5,9% foram avaliadas por apresentarem valores satisfatórios de compacidade no ensaio de compactação por cisalhamento giratório. Para cada teor de ligante foram moldados 12 corpos-de-prova, preparando um total de 60 corpos-de-prova. Antes da ruptura, os corpos-de-prova passaram pelo processo de condicionamento explicado no item anterior. Após o processo de condicionamento, foram levados à ruptura 50 corpos-de-prova. Verificou-se a evolução da tensão de ruptura, a compressão simples, com e sem condicionamento na água em função do teor de ligante, com as variáveis de formulação granulometria e tamanho

máximo constante, na Figura 85, é apresentada o conjunto de corpos-de-prova após a ruptura.



**Figura 85.** Mistura de módulo elevado, corpos de prova Duriez após a ruptura.

A tensão de ruptura a compressão simples dos corpos-de-prova condicionados a 18°C e umidade relativa de 50% foi denotada como (R) e a tensão de ruptura dos corpos-de-prova condicionados e submersos na água a 18°C como (r). Antes do processo de ruptura de cada conjunto de corpos-de-prova, a velocidade de avanço da prensa foi verificada para garantir a homogeneidade dos resultados. Os resultados da resistência a seco (R) e submerso (r) são apresentados na Tabela 36.

**Tabela 36.** Mistura de módulo elevado, tensão de ruptura.

| Teor de ligante (%) | r, (Mpa)<br>Médio | R, (Mpa)<br>médio | r/R<br>- | Altura (mm) | Vv (%)<br>Médio |
|---------------------|-------------------|-------------------|----------|-------------|-----------------|
| 5.1                 | 21.74             | 23.32             | 0.93     | 86.62       | 8.86            |
| 5.3                 | 23.13             | 23.92             | 0.97     | 85.41       | 8.02            |
| 5.5                 | 23.84             | 26.12             | 0.91     | 84.99       | 7.38            |
| 5.7                 | 24.69             | 26.57             | 0.93     | 84.80       | 6.78            |
| 5.9                 | 24.98             | 25.40             | 0.98     | 84.89       | 6.35            |

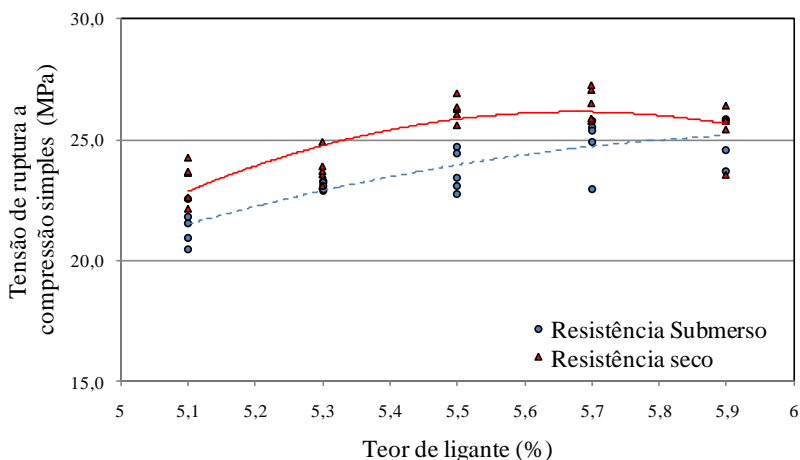


O ensaio permitiu verificar além da redução tensão de ruptura, a compressão simples pelo efeito da água, a compacidade e a evolução da tensão de ruptura com o aumento do teor de ligante com e sem efeito da água, ressaltando que a compacidade obtida neste ensaio não tem relação com a compacidade das misturas em campo.

Os valores da tensão de ruptura ( $R$ ) dos corpos-de-prova condicionados a  $18^{\circ}\text{C}$  e umidade relativa de 50% variaram entre 23,32MPa a 25,4MPa para os teores de ligantes de 5,1% e 5,9% respectivamente. Para as misturas condicionadas na água variou de 21,74MPa a 24,98MPa para os teores de ligantes de 5,1% e 5,9% respectivamente. No que diz a respeito à relação entre a resistência submersa e seca não se percebe claramente uma tendência, pois ocorreu primeiramente uma diminuição e seguida de um aumento.

As alturas atingidas para os corpos-de-prova variaram de 86,62mm a 84,89mm, que conseqüentemente, resultou em volume de vazios 8,86% a 6,35% para os teores de ligantes de 5,1% e 5,9% respectivamente. Embora a compacidade obtida neste ensaio não tenha relação com a compacidade real da mistura em campo, permite evidenciar a relação entre a compacidade e os valores de resistência.

Para todas as composições avaliadas os valores de  $r/R$  foram muito superiores ao 0,75 estabelecido para as misturas do tipo módulo elevado classe 2 conforme a norma NF P 98 -140, com pouca influência da água na tensão de ruptura (Figura 86).



**Figura 86.** Mistura de módulo elevado, tensão de ruptura com e sem condicionamento.

### 5.2.2 Mistura grave-bitume

Foram avaliadas as composições com teores de ligante de 4,3% até 4,9%, rejeitando o teor de ligante igual a 4,1%, devido a que este não apresentou resultados satisfatórios no ensaio de compactação por cisalhamento giratório. Foram moldados um total de 48 corpos-de-prova, sendo 12 corpos-de-prova para cada teor de ligante. A preparação das misturas foi realizada de maneira individual ao igual que para as misturas de módulo elevado garantindo a composição granulométrica para cada corpo-de-prova, mantendo fixa tanto a composição granulométrica como o tamanho máximo, sendo o único parâmetro variável o teor de ligante. Foram levados à ruptura 40 corpos-de-prova, dos quais metade corresponderam aos corpos-de-prova sob condicionamento em imersão na água a 18°C por um período de 7 dias e a metade sem imersão a temperatura de 18°C e umidade relativa de 50% (Figura 87).



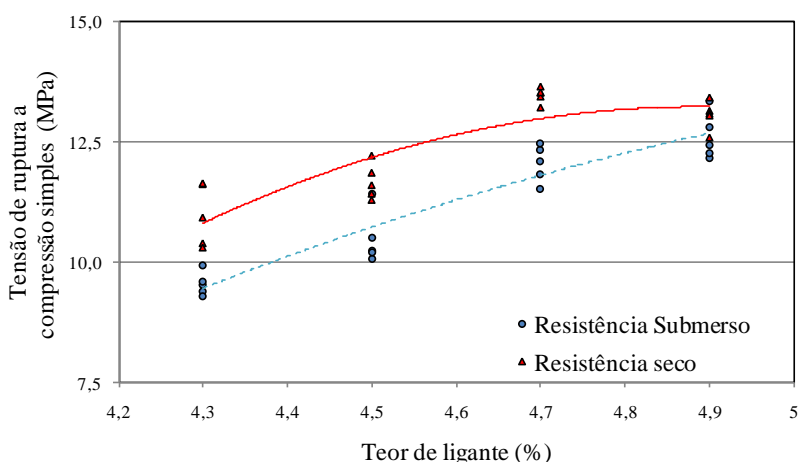
**Figura 87.** Mistura grave-bitume, corpos-de-prova Duriez da após da ruptura.

Os resultados da tensão de ruptura a compressão simples dos corpos-de-prova condicionados a 18°C (R) e condicionados a 18°C e umidade relativa de 50% (r) são apresentados na (Tabela 37).

**Tabela 37.** Mistura *grave-bitume*, tensão de ruptura.

| Teor de ligante (%) | r, (MPa) médio | R, (MPa) médio | r/R - | Altura (mm) | Vv, (%) Médio |
|---------------------|----------------|----------------|-------|-------------|---------------|
| 4.3                 | 9.48           | 10.97          | 0.86  | 89.36       | 10.07         |
| 4.5                 | 10.33          | 11.72          | 0.88  | 88.81       | 9.81          |
| 4.7                 | 12.16          | 13.54          | 0.90  | 88.61       | 9.83          |
| 4.9                 | 12.67          | 12.99          | 0.98  | 88.35       | 8.14          |

A tensão de ruptura, sob compressão simples das misturas condicionadas na água a 18°C esteve entre 9,48MPa e 12,67MPa para os teores de ligantes de 4,3% e 4,9%, respectivamente, e para as misturas condicionadas a 18°C e umidade relativa de 50% a tensão de ruptura variou entre 10,97MPa e 12,99MPa para os teores de ligante de 4,3% e 4,9%, respectivamente. Evidenciou-se uma tendência da relação r/R variando entre 0,86 a 0,98 para os teores de ligante de 4,3% e 4,9%. O volume de vazios variou entre 10,07% para o teor de ligante de 4,3% e 8,14% para o teor de ligante de 4,9%. Todos os teores de ligante estiveram dentro do limite de perda de resistência pela ação da água estabelecido para o tipo de mistura *grave-bitume*, sendo a relação r/R superior a 0,75 em conformidade com a norma NF P 98 – 138 (Figura 88).

**Figura 88.** Mistura *grave-bitume*, tensão de ruptura.

### 5.3 ENSAIOS DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Os resultados do ensaio de deformação permanente para todas as composições analisadas apresentaram resultados satisfatórios no que respeita ao critério de formulação, sendo inferior a 7,5% no nível dos 30000 ciclos para a mistura de módulo elevado e inferior a 10% no nível dos 10000 ciclos.

O ensaio de deformação permanente foi realizado segundo o procedimento normativo NF P 98-253-1, 1993, em placas de dimensões 18cmx50cmx10cm.

#### 5.3.1 Mistura de módulo elevado

Os resultados apresentados correspondem ao valor calculado por regressão de duas placas para cada teor de ligante, calculado pelas equação 77 e equação 78 do capítulo anterior. Os teores de ligantes variaram entre 5,1% até 5,7%, rejeitando o teor de ligante de 5,9%. Apesar deste teor de ligante apresentar valores satisfatórios, observou-se, tanto no ensaio de compactação por cisalhamento giratório como no ensaio Duriez, um excesso de ligante. O volume de vazios inicial das placas antes do ensaio em função do teor de ligante e o afundamento por deformação permanente é apresentado na (Tabela 38).

**Tabela 38.** Volume de vazios das placas para ensaio de deformação permanente.

| Placa No | % Ligante | Volume de vazios (%) – EME 2 | % Deformação permanente 30000 ciclos Regressão |
|----------|-----------|------------------------------|--|
| 1        | 5,1%      | 3,77                         | 2,31   |
| 2        |           | 3,90                         |  |
| 3        |           | 2,56                         |  |
| 4        | 5,3%      | 3,04                         | 3,04   |
| 5        | 5,5%      | 3,01                         | 3,73   |
| 6        |           | 2,72                         |  |
| 7        |           | 2,58                         |  |
| 8        | 5,7%      | 2,46                         | 5,20   |

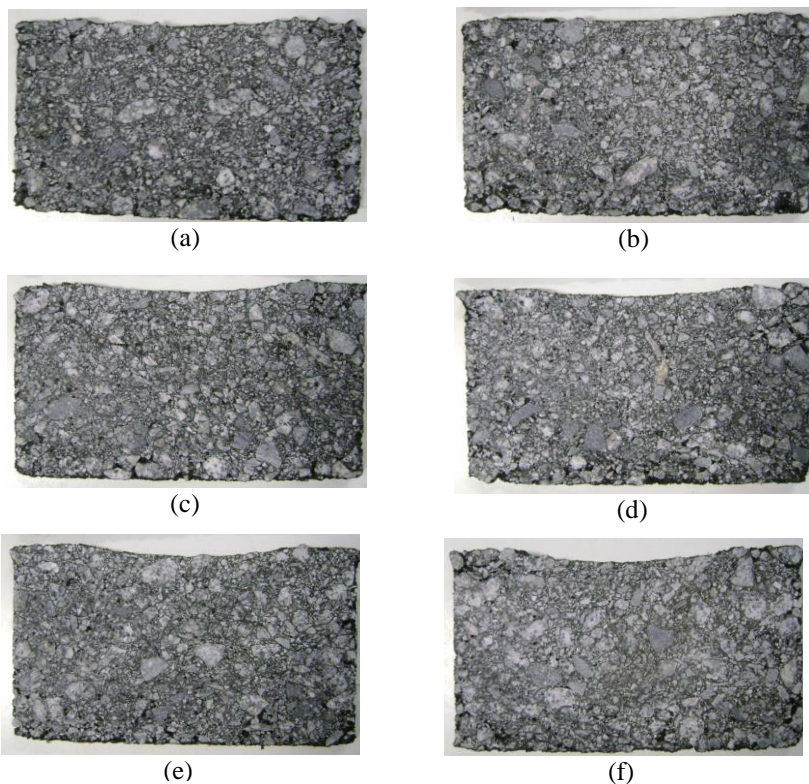
As variações do afundamento estiveram entre 2,31% e 5,20% para os teores de ligantes de 5,1% e 5,7%, respectivamente. O volume de vazios das placas utilizadas nos ensaios esteve entre 3,77% para o teor de ligante de 5,1% e 2,46% para o teor de ligante de 5,7%, estando inferior a 6% ao limite estipulado para este tipo de misturas na norma NF P 98 -140.

As misturas testadas garantiram, à temperatura de condicionamento de 60°C, seja por fluência ou por densificação, valores de afundamento inferiores a valores limites estabelecidos para este tipo de mistura. Sendo que para a mistura de módulo elevado classe 2 a profundidade de afundamento por deformação permanente deve ser inferior a 7,5% no nível dos 30000 ciclos medido em placas de 10cm de espessura. Na figura 89 é ilustrado o aspecto das placas para os teores de 5,1% a 5,5%, não é apresentado o teor de 5,7% por que permaneceram no laboratório de pavimentação da EPUSP após do ensaio.



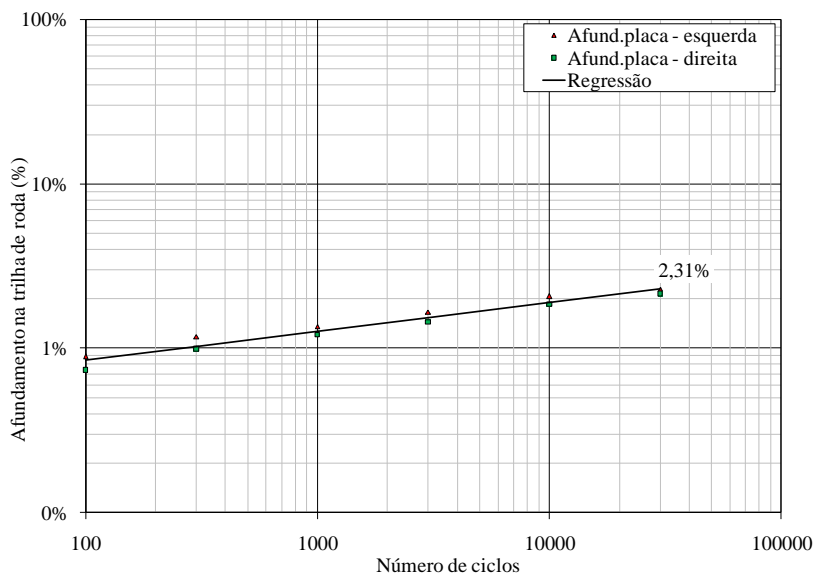
**Figura 89.** Mistura de módulo elevado, placas após do ensaio de deformação permanente.

Cortes realizados no centro das placas permitieram visualizar melhor o afundamento com o incremento do teor de ligante, e a boa distribuição dos granulares devido a uma curva granulometrica bem definida, são ilustrados na figura 90.

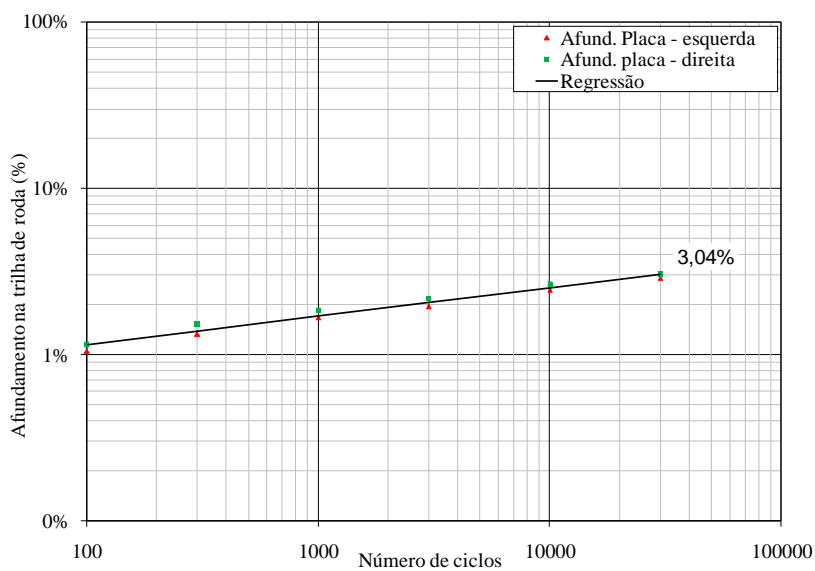


**Figura 90.** Cortes das placas (a) 5,1% ligante - Placa 01 (b) 5,1% ligante - Placa 02 (c) 5,3% ligante - Placa 03 (d) 5,3% ligante - Placa 04 (e) 5,5% ligante - Placa 05 (f) 5,5% ligante - Placa 06.

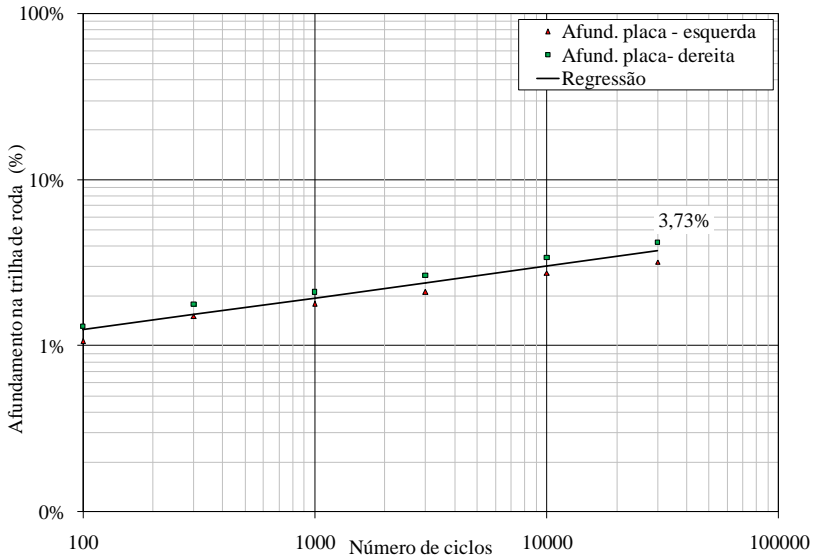
Os resultados de deformação permanente correspondente às leituras no nível dos 0, 100, 300, 1000, 3000, 10000 e 30000 ciclos são ilustrados nas Figura 91a Figura 94.



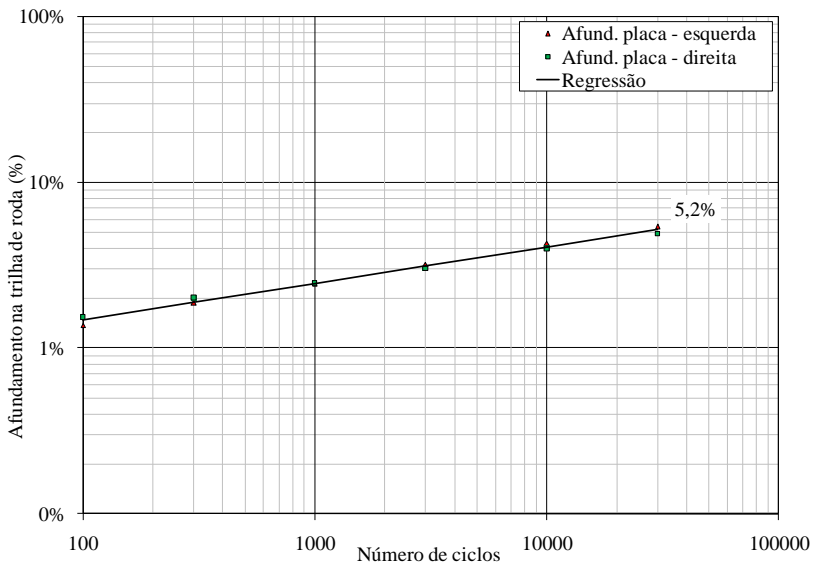
**Figura 91.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.1%.



**Figura 92.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.3%.



**Figura 93.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.5%.



**Figura 94.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura de módulo elevado teor 5.7%.



### 5.3.2 Mistura *grave-bitume*

As placas foram preparadas para os teores de ligantes 4,3% até 4,9%. A profundidade de afundamento das misturas asfálticas ensaiadas foi inferior a 10% no nível dos 10000 ciclos.

Na Tabela 39 são apresentados o volumem de vazios inicial das placas antes do ensaio e o respectivo valor de afundamento nos 10000 e 30000 ciclos para as composições avaliadas.

**Tabela 39.** Mistura *grave-bitume*, ensaio de deformação permanente.

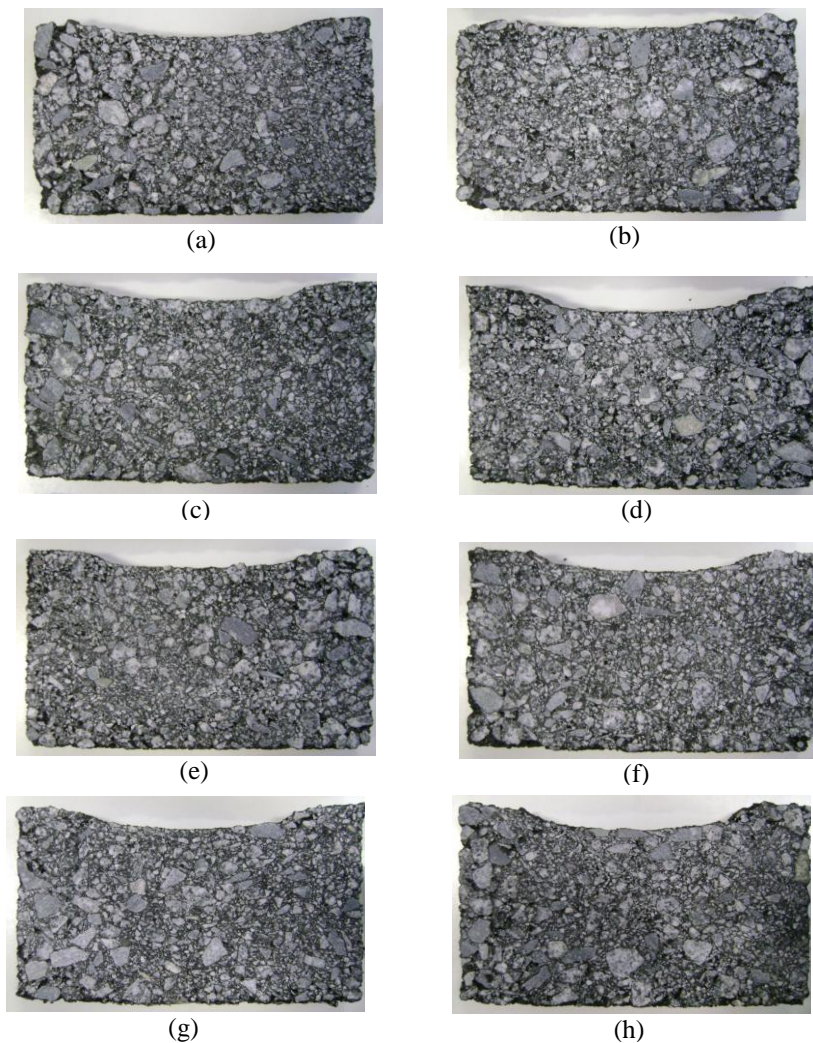
| Placa No | % Ligante | Volumem de vazios (%) GB 3 | %Deformação Permanente 10000 ciclos | %Deformação Permanente 30000 ciclos |
|----------|-----------|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1        | 4,3%      | 7,35                       | 3,45                                | 4,10                                |
| 2        |           | 6,78                       |                                     |                                     |
| 3        |           | 6,57                       |                                     |                                     |
| 4        | 4,5%      | 6,60                       | 4,00                                | 4,58                                |
| 5        | 4,7%      | 5,91                       | 4,02                                | 4,66                                |
| 6        |           | 6,42                       |                                     |                                     |
| 7        |           | 4,54                       |                                     |                                     |
| 8        | 4,9%      | 5,06                       | 4,33                                | 5,08                                |

O afundamento no nível dos 10000 ciclos variou de 3,45% até 4,33% para os teores de ligante de 4,3% a 4,9%, respectivamente. Para as placas testadas o volume de vazios variou de 4,54% a 7,35%, sendo inferior a 10%. Além de verificar o afundamento no nível dos 10000 ciclos, foi verificado o afundamento no nível dos 30000 ciclos, variando os valores entre 4,10% até 5,08% para os teores de ligantes 4,3% a 4,9%, respectivamente. O afundamento das placas no nível dos 30000 ciclos é ilustrado na (Figura 95).



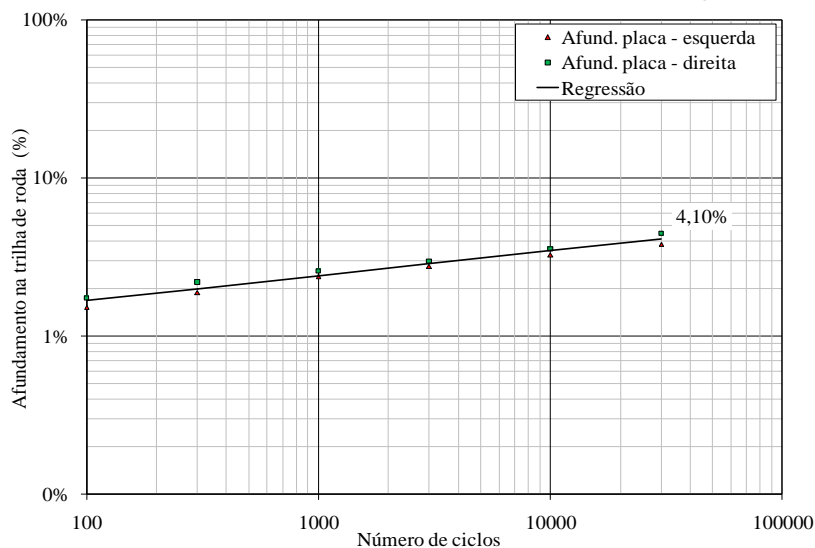
**Figura 95.** Mistura *grave-bitume*, placas após do ensaio de deformação permanente.

Cortes realizados no centro das placas permitem visualizar melhor o afundamento em função do teor de ligante (Figura 96).

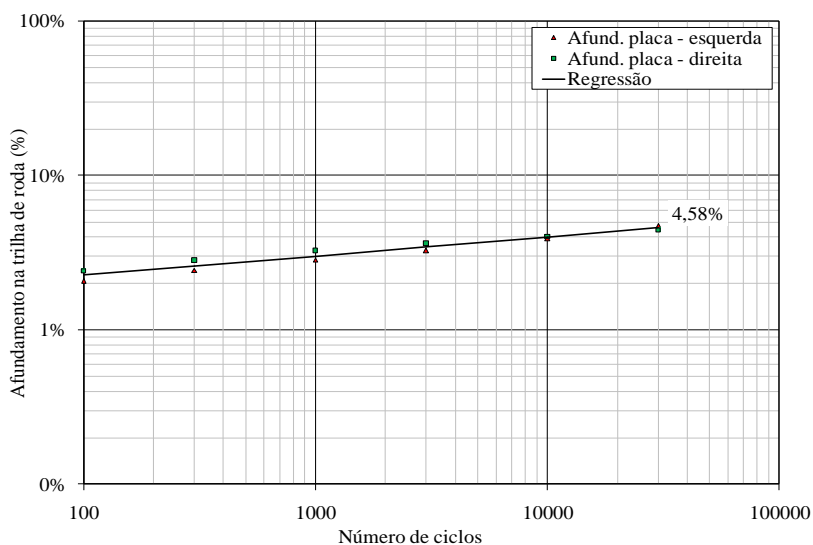


**Figura 96.** Cortes das placas (a) 4,3% ligante - Placa 01 (b) 4,3% ligante - Placa 02 (c) 4,5% ligante - Placa 03 (d) 4,5% ligante - Placa 04 (e) 4,7% ligante - Placa 05 (f) 4,7% ligante - Placa 06 (g) 4,9% ligante - Placa 07 (h) 4,9% ligante - Placa 08.

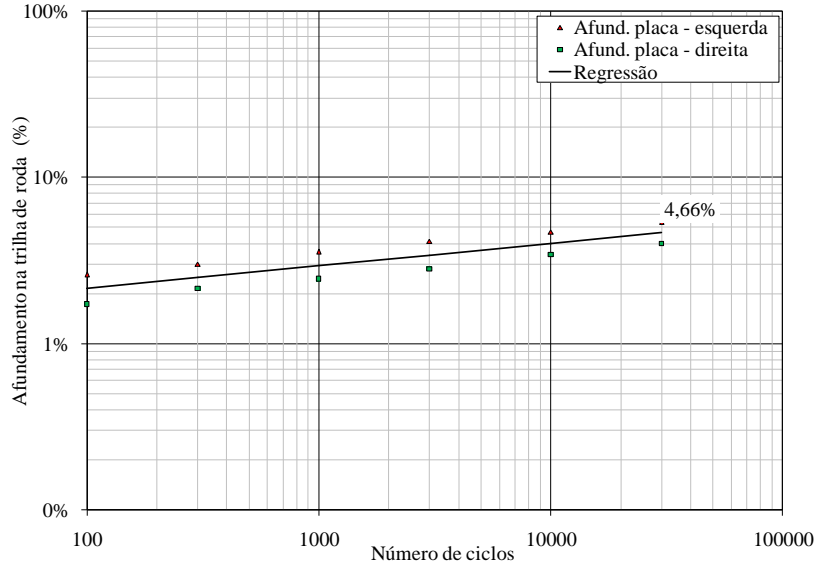
Os resultados do ensaio de deformação permanente para a mistura *grave-bitume* são ilustrados nas Figura 97 a Figura 100.



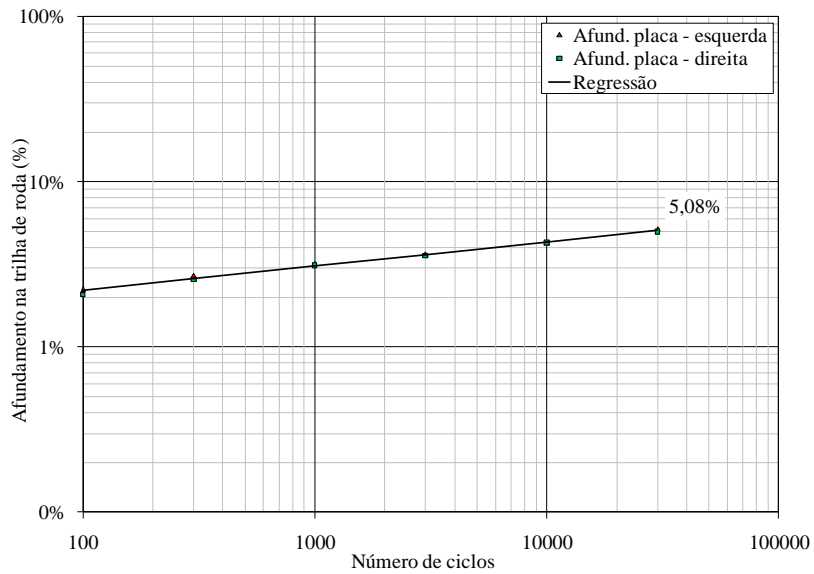
**Figura 97.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura *grave-bitume* teor 4.3%.



**Figura 98.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, mistura *grave-bitume* teor 4.5%.



**Figura 99.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura grave-bitume teor 4,7%.



**Figura 100.** Deformação permanente - N. de ciclos x Afundamento, Mistura grave-bitume teor 4,9%.

## 5.4 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

A rigidez das misturas asfálticas foi determinada no ensaio de módulo complexo com teor de ligante de 5,7% para a mistura de módulo elevado e 4,5% de teor de ligante para a mistura *grave-bitume*, por apresentar resultados satisfatórios nos ensaios precedentes de compactação, resistência à água e deformação permanente.

Entre as considerações levadas em conta para a seleção do teor de 5,7% para a mistura de módulo elevado, partiu-se dos ensaios de formulação. Os ensaios realizados de formulação direcionam a seleção do teor de ligante, proporcionando suficientes ferramentas em função do tipo de mistura formulada, sendo estes de caráter eliminatório em cada nível. A mistura de módulo elevado foi formulada com ligante de consistência muito elevada com penetração igual a  $10 \times 10^{-1}$  mm, no qual o ligante apresenta uma elevada rigidez, procura-se que o teor de ligante selecionado cumplice com todos os critérios de formulação nos ensaios de formulação de compactação por cisalhamento giratório, ensaio Duriez e sobre tudo no ensaio de deformação permanente, já que um teor de ligante elevado poderia comprometer o comportamento da mistura no que respeita a afundamento por deformação permanente, mas também poderia favorecer o comportamento na fadiga da mistura asfáltica que só pode ser verificado nos ensaios respectivos.

A mistura *grave-bitume* foi formulada com ligante com uma consistência media com penetração igual a  $37 \times 10^{-1}$  mm, esta mistura tem a particularidade que com pouco consumo de ligante garantir o desempenho do material. O modulo de riqueza mínimo para esta mistura foi de misturas é de 2,8 que consequentemente resultou em um teor de ligante mínimo de 4,0%, sendo adotados para avaliar teores de ligantes de 4,1% ate 4,9% com incrementos de 0,2%. Já o teor de ligante de 4,1% não cumpriu no ensaio de compactação por cisalhamento giratório com o critério de compacidade, com volume de vazios inferior a 10%, a partir de 4,3% encontraram-se valores satisfatórios porem muito perto do limite dos 10%, adotando-se como teor de ligante a ser levado a outro nível de formulação o teor de ligante de 4,5%.

Duas placas de dimensões 40cmx60cmx12cm foram preparadas para cada teor de ligante, conforme o procedimento descrito no item 4.6.4 do capítulo anterior. A determinação da massa volumétrica aparente foi realizada por passagem hidrostática, realizando o respectivo cálculo do volume de vazios (Tabela 40).

**Tabela 40.** Propriedades volumétricas das placas para módulo e fadiga.

| Mistura       | PESO SECO<br>(kg) | MVA<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | MVR<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Vv<br>(%) |
|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------|
| Placa 1 EME 2 | 69,60             | 2,43                        | 2,501                       | 2,7       |
| Placa 2 EME 2 | 69,56             | 2,43                        | 2,501                       | 2,6       |
| Placa 1 GB 3  | 67,94             | 2,35                        | 2,523                       | 6,7       |
| Placa 2 GB3   | 67,96             | 2,37                        | 2,523                       | 6,2       |

De cada placa moldada foram obtidos, através do processo de serragem descrito no capítulo anterior, 20 corpos-de-prova, sendo um total de 40 corpos-de-prova para cada tipo de mistura, dos quais passaram por uma triagem em função das dimensões ( $K\varepsilon$ ) e volume de vazios. Foram selecionados quatro corpos-de-prova para os ensaios de módulo complexo, e no mínimo 18 para cada ensaio de fadiga.

Os corpos-de-prova selecionados da mistura de módulo elevado tiveram coeficiente de variação de  $K\varepsilon$  igual a 0,53% e desvio padrão do volume de vazios de 0,44%. Para a mistura *grave-bitume* o coeficiente de variação de  $K\varepsilon$  igual a 0,37% e desvio padrão do volume de vazios de 0,39%, inferiores aos valores estabelecidos pelas normas no qual o coeficiente de variação deve ser inferior a  $\leq 1,0\%$  e o desvio padrão do volume de vazios inferior a  $\leq 0,5\%$  (Tabela 41).

**Tabela 41.** Desvio padrão do Vv e coeficiente de variação de  $K\varepsilon$  dos corpos-de-prova selecionados para o ensaio de módulo e fadiga.

| Tipo de mistura     | $\sigma$ , Vv | Cv, $K\varepsilon$ | Especificação<br>$\sigma$ , Vv | Especificação<br>Cv, $K\varepsilon$ |
|---------------------|---------------|--------------------|--------------------------------|-------------------------------------|
| Módulo elevado      | 0,44%         | 0,53%              | <0,5%                          | <1,0%                               |
| <i>Grave-bitume</i> | 0,39%         | 0,37%              | <0,5%                          | <1,0%                               |

$\sigma$ , Vv: Desvio padrão dos vazios;

Cv,  $K\varepsilon$ : Coeficiente de variação do volume de vazios.

#### 5.4.1 Mistura de módulo elevado

O valor do módulo complexo medido a 15°C e 10Hz foi 16595MPa, superior ao valor mínimo que deve ser atingido para o tipo de misturas de módulo elevado de 14000MPa. O valor de 14000MPa é um parâmetro mínimo de formulação. No dimensionamento de pavimentos é utilizado os valores de módulo medido a 15°C por ser a temperatura de referência na França, e 10Hz por ser a frequência representativa equivalente aproximadamente a 72Km/hr.

As medidas de módulo complexo foram realizadas na flexão alternada mediante solicitação sinusoidal para as temperaturas de -10°C,

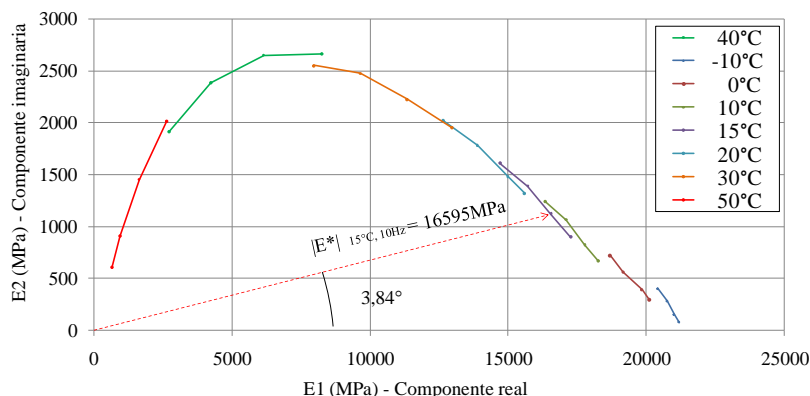
0°C, 10°C, 15°C, 20°C, 30°C, 40°C e 50°C e para cada temperatura nas frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz. A deformação controlada do ensaio foi de 40 $\mu$ def. Os ensaios seguem os procedimentos segundo a norma NF P 98-260-2, 1992. Para a determinação do módulo complexo partiu-se da temperatura de -10°C condicionando os corpos-de-prova durante seis horas, após as medições para todas as frequências de ensaio os mesmos corpos-de-prova foram condicionados à temperatura de 0°C durante quatro horas, determinando sucessivamente o módulo do material para um espectro de temperaturas e frequências. Os resultados do ensaio de módulo complexo são apresentados na tabela 42.

**Tabela 42.** Resultados do ensaio de módulo complexo, mistura EME 2.

| TEMPERATURA<br>(°C) | FREQUÊNCIA<br>(Hz) | E <sub>1</sub><br>(Mpa) | E <sub>2</sub><br>(Mpa) | E* <br>(MPa) | $\phi$<br>(°) |
|---------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|--------------|---------------|
| -10                 | 30                 | 21186,2                 | 77,7                    | 21186,4      | 0,21          |
| -10                 | 10                 | 21007,5                 | 150,5                   | 21008,0      | 0,41          |
| -10                 | 3                  | 20759,4                 | 282,8                   | 20761,3      | 0,78          |
| -10                 | 1                  | 20418,2                 | 404,1                   | 20422,2      | 1,14          |
| 0                   | 30                 | 20117,0                 | 294,1                   | 20119,1      | 0,84          |
| 0                   | 10                 | 19839,2                 | 391,7                   | 19843,1      | 1,13          |
| 0                   | 3                  | 19162,3                 | 563,7                   | 19170,6      | 1,68          |
| 0                   | 1                  | 18682,2                 | 724,0                   | 18696,3      | 2,23          |
| 10                  | 30                 | 18263,4                 | 669,7                   | 18275,7      | 2,10          |
| 10                  | 10                 | 17776,4                 | 823,1                   | 17795,6      | 2,63          |
| 10                  | 3                  | 17099,9                 | 1069,3                  | 17133,3      | 3,56          |
| 10                  | 1                  | 16333,8                 | 1244,2                  | 16381,1      | 4,34          |
| 15                  | 30                 | 17275,8                 | 896,6                   | 17299,1      | 2,98          |
| 15                  | 10                 | 16556,8                 | 1121,7                  | 16594,9      | 3,84          |
| 15                  | 3                  | 15704,1                 | 1387,3                  | 15765,4      | 5,02          |
| 15                  | 1                  | 14695,4                 | 1609,9                  | 14783,5      | 6,21          |
| 20                  | 30                 | 15600,5                 | 1317,5                  | 15656,2      | 4,83          |
| 20                  | 10                 | 14997,6                 | 1480,0                  | 15070,9      | 5,58          |
| 20                  | 3                  | 13888,9                 | 1784,6                  | 14003,4      | 7,28          |
| 20                  | 1                  | 12643,5                 | 2025,4                  | 12805,2      | 9,05          |
| 30                  | 30                 | 12970,9                 | 1953,5                  | 13117,6      | 8,57          |
| 30                  | 10                 | 11337,4                 | 2225,8                  | 11554,1      | 11,06         |
| 30                  | 3                  | 9648,3                  | 2475,9                  | 9961,3       | 14,37         |
| 30                  | 1                  | 7948,8                  | 2550,8                  | 8348,3       | 17,76         |
| 40                  | 30                 | 8268,7                  | 2666,6                  | 8688,5       | 17,88         |
| 40                  | 10                 | 6144,5                  | 2653,7                  | 6695,7       | 23,48         |
| 40                  | 3                  | 4225,4                  | 2387,9                  | 4856,1       | 29,70         |
| 40                  | 1                  | 2711,0                  | 1915,3                  | 3319,6       | 35,36         |
| 50                  | 30                 | 2627,1                  | 2015,4                  | 3311,2       | 37,50         |
| 50                  | 10                 | 1633,9                  | 1454,4                  | 2187,6       | 41,67         |
| 50                  | 3                  | 961,4                   | 913,3                   | 1326,1       | 43,53         |
| 50                  | 1                  | 662,5                   | 608,7                   | 899,8        | 42,60         |

Os resultados do ensaio de módulo complexo são apresentados nas representações clássicas (representação no plano Cole-Cole, em curvas isócronas, em curvas isotermas, o espaço Black e a curva equivalência temperatura).

Para a representação no plano Cole-Cole foi desenhado nas abscissas as parcela real do módulo (elástica) e nas ordenadas à parcela imaginária (viscosa). Nesta representação observou-se o comportamento das duas parcelas em função da temperatura e da frequência, na medida que aumenta a frequência aumenta a componente real. (Figura 101).

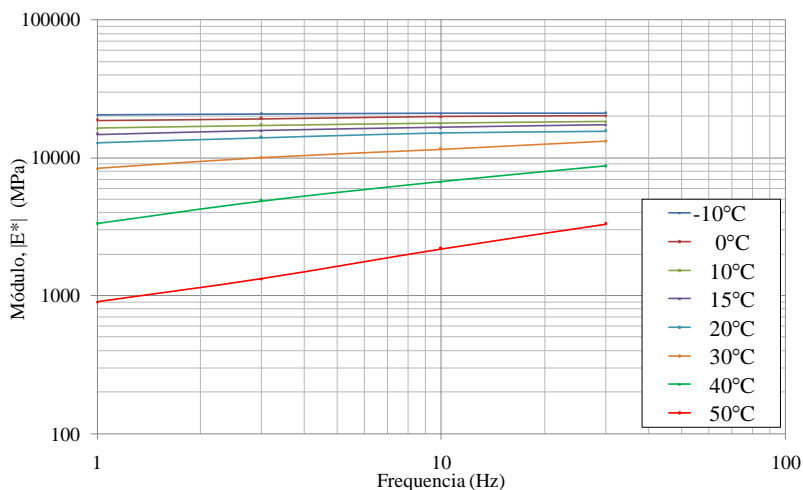


**Figura 101.** Mistura de módulo elevado, representação plano Cole-Cole.

A influência da velocidade de aplicação da carga e da temperatura é visualizada desenhando, em escala logarítmica, o módulo complexo em função da frequência para cada temperatura de ensaio.

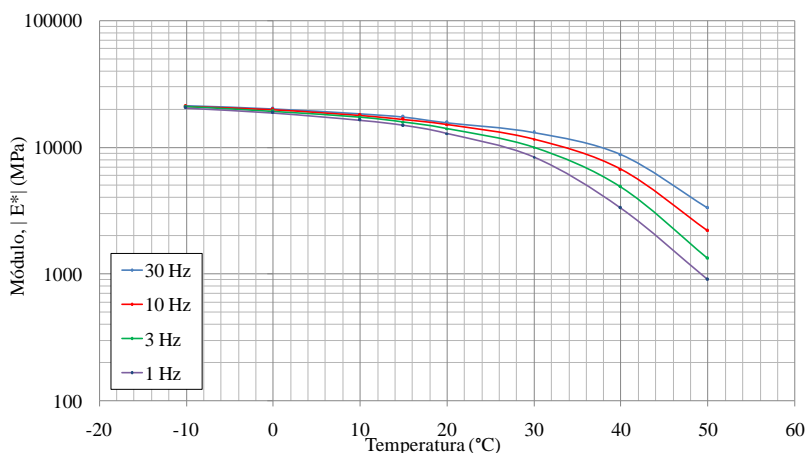
Nesta figura observa-se que aproximadamente até a temperatura de 20°C, há uma distribuição homogênea das curvas, com pouca variação nas ordenadas e também se ressalta o fato das curvas serem mais horizontais até esta temperatura devido a pouca influência da frequência no módulo da mistura de concreto asfáltico de módulo elevado, os resultados dos ensaios desenhados forma estão apresentados na Figura 102.





**Figura 102.** Mistura de módulo elevado, representação curvas isotermas.

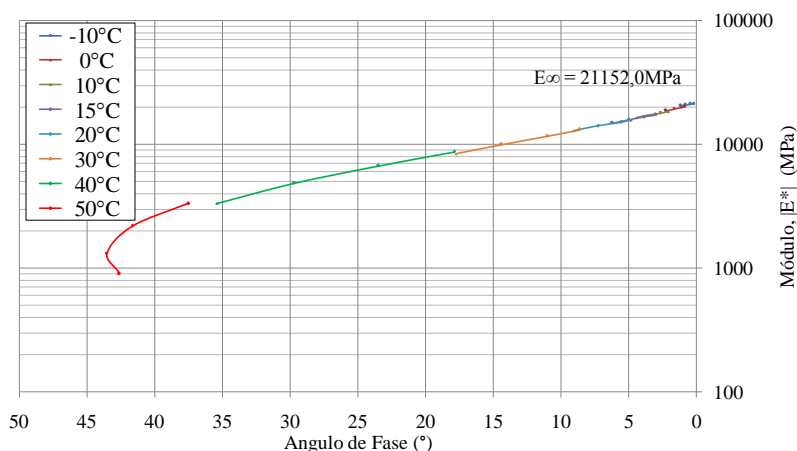
A representação em curvas isócronas permitiu visualizar a variação do módulo complexo em função da temperatura para uma frequência de ensaio, os resultados plotados desta forma estão apresentados na Figura 103. Na medida em que a temperatura aumenta o módulo complexo diminui, ou seja, o material torna-se menos rígido, é possível observar uma maior variação do valor de módulo nas altas temperaturas que nas baixas temperaturas.



**Figura 103.** Mistura de módulo elevado, representação curvas isócronas.

A representação no espaço Black permitiu visualizar a variação do ângulo de fase e módulo complexo com a temperatura. Nesta reapresentação desenhou-se, em escala semi-logarítmica, a evolução do módulo complexo nas ordenadas com o ângulo de fase nas abscissas (Figura 104).

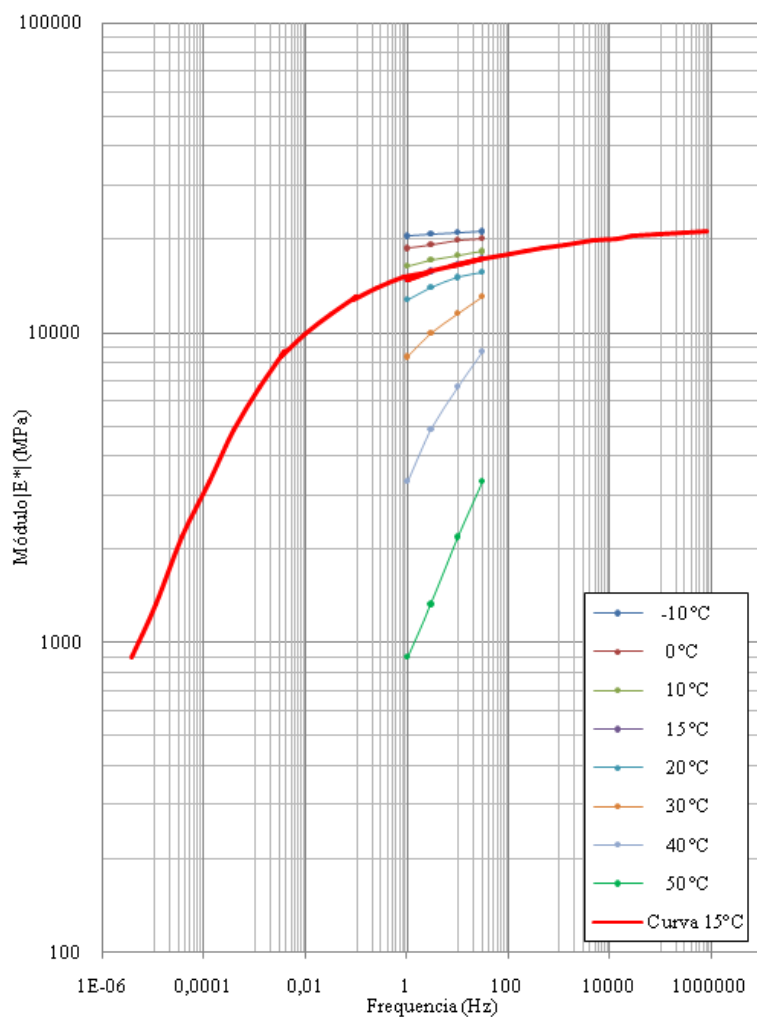
Na medida em que a temperatura aumenta, o ângulo de fase aumenta e o módulo complexo diminui. Esta representação também serve para determinar o módulo  $E_\infty$ , que será utilizado no modelo de Huet-Sayegh.



**Figura 104.** Mistura de módulo elevado representação no espaço Black.

Não é coerente atribuir um único módulo para os concretos asfálticos sem conhecer previamente a temperatura e frequência equivalente de aplicação no campo, pois se trata de um material viscoelástico, no qual seu comportamento varia fortemente com a temperatura.

A representação do módulo para uma única temperatura é possível pela translação das curvas isotérmicas a uma temperatura de referência. Esta curva foi construída pelo método gráfico, permitindo conhecer o módulo do material para um espectro amplo de frequência a uma temperatura dada (Figura 105).



**Figura 105.** Mistura de módulo elevado curva equivalência frequência temperatura para 15°C.

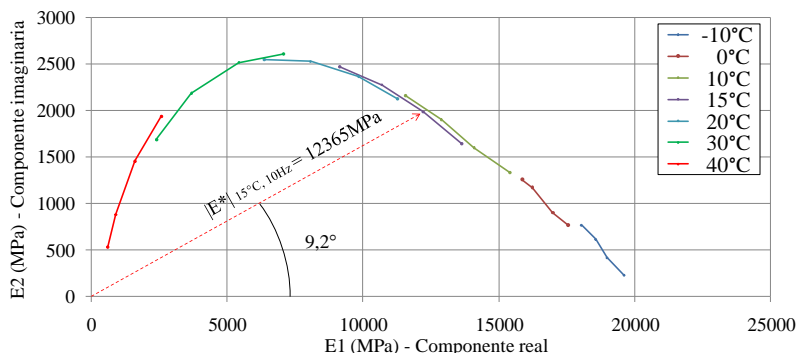
### 5.4.2 Mistura grave-bitume

O valor de módulo complexo medido a 15°C e 10Hz foi 12365MPa superior ao módulo estabelecido na norma NF P 98 – 138 para misturas *grave-bitume* igual a 9000MPa. Foram ensaiados quatro corpos-de-prova simultaneamente, mediante solicitação alternada sinusoidal no intervalo de temperaturas de -10°C a 40°C. Para cada temperatura foram determinados os módulos nas frequências de 1Hz, 3Hz, 10Hz e 30Hz. Os resultados são apresentados na tabela 43.

**Tabela 43.** Resultados do ensaio de módulo complexo, mistura GB 3.

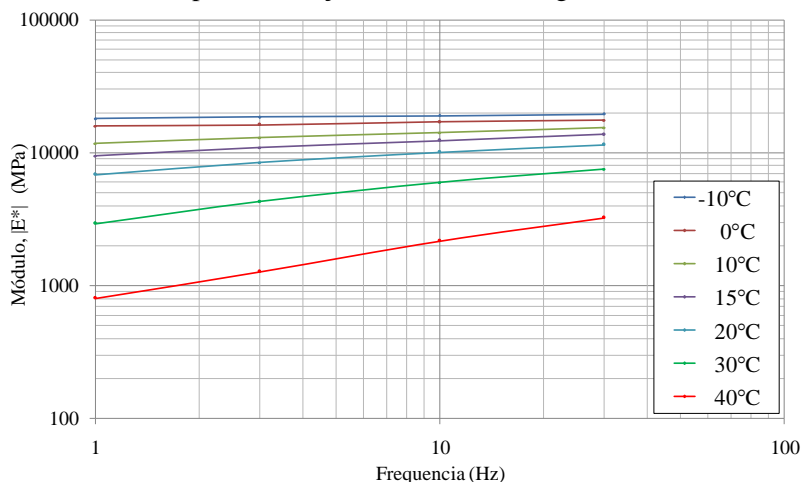
| TEMPERATURA<br>(°C) | FREQUÊNCIA<br>(Hz) | E1<br>(MPa) | E2<br>(MPa) | E*<br>(MPa) | $\phi$<br>(°) |
|---------------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|
| -10                 | 30                 | 19602       | 231         | 19604       | 0,68          |
| -10                 | 10                 | 18977       | 418         | 18982       | 1,26          |
| -10                 | 3                  | 18561       | 617         | 18571       | 1,89          |
| -10                 | 1                  | 18034       | 769         | 18050       | 2,43          |
| 0                   | 30                 | 17560       | 767         | 17577       | 2,50          |
| 0                   | 10                 | 16982       | 901         | 17006       | 3,03          |
| 0                   | 3                  | 16233       | 1169        | 16275       | 4,10          |
| 0                   | 1                  | 15853       | 1258        | 15904       | 4,55          |
| 10                  | 30                 | 15410       | 1329        | 15467       | 4,93          |
| 10                  | 10                 | 14088       | 1596        | 14178       | 6,44          |
| 10                  | 3                  | 12878       | 1897        | 13017       | 8,36          |
| 10                  | 1                  | 11551       | 2159        | 11751       | 10,56         |
| 15                  | 30                 | 13620       | 1641        | 13720       | 6,87          |
| 15                  | 10                 | 12205       | 1983        | 12365       | 9,20          |
| 15                  | 3                  | 10687       | 2273        | 10927       | 11,99         |
| 15                  | 1                  | 9130        | 2468        | 9459        | 15,12         |
| 20                  | 30                 | 11278       | 2123        | 11478       | 10,61         |
| 20                  | 10                 | 9838        | 2364        | 10118       | 13,50         |
| 20                  | 3                  | 8062        | 2528        | 8450        | 17,42         |
| 20                  | 1                  | 6354        | 2550        | 6848        | 21,91         |
| 30                  | 30                 | 7060        | 2605        | 7526        | 20,25         |
| 30                  | 10                 | 5422        | 2514        | 5977        | 24,89         |
| 30                  | 3                  | 3671        | 2184        | 4272        | 30,81         |
| 30                  | 1                  | 2386        | 1684        | 2921        | 35,28         |
| 40                  | 30                 | 2575        | 1941        | 3225        | 37,00         |
| 40                  | 10                 | 1605        | 1455        | 2168        | 42,35         |
| 40                  | 3                  | 907         | 881         | 1266        | 44,47         |
| 40                  | 1                  | 602         | 527         | 802         | 41,75         |

A continuação são apresentados os gráficos das representações da mistura *grave-bitume* formulada com ligante CAP 30/45. É ilustrada a representação no plano Cole-Cole o respectivo valor do módulo e ângulo de fase (Figura 106).



**Figura 106.** Mistura *grave-bitume*, representação no plano Cole-Cole.

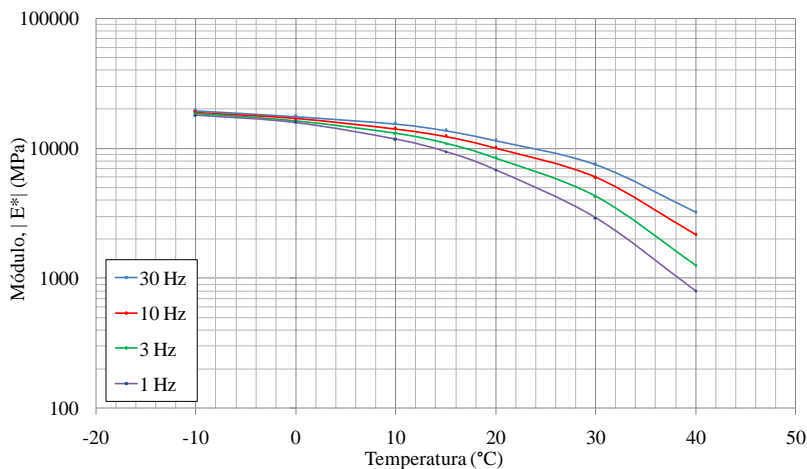
A representação em curvas isotermas permite evidenciar a maior variação nos valores de módulo em função da frequência a partir dos 10°C, observado pela inclinação destas curvas (Figura 107).



**Figura 107.** Mistura *grave-bitume* representação em curvas isotermas.

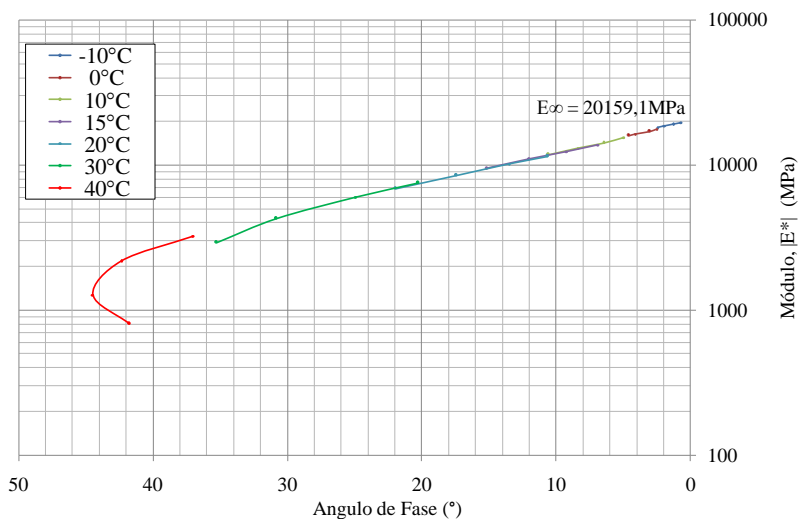
A representação em curvas isócronas evidencia a variação do módulo complexo, com a temperatura entre -10°C a 40°C para cada

freqüência. Na medida que a temperatura aumenta a uma variação maior do módulo. Nesta representação pode-se observar também que na medida que a freqüência aumenta o módulo complexo conseqüentemente aumenta (Figura 108).



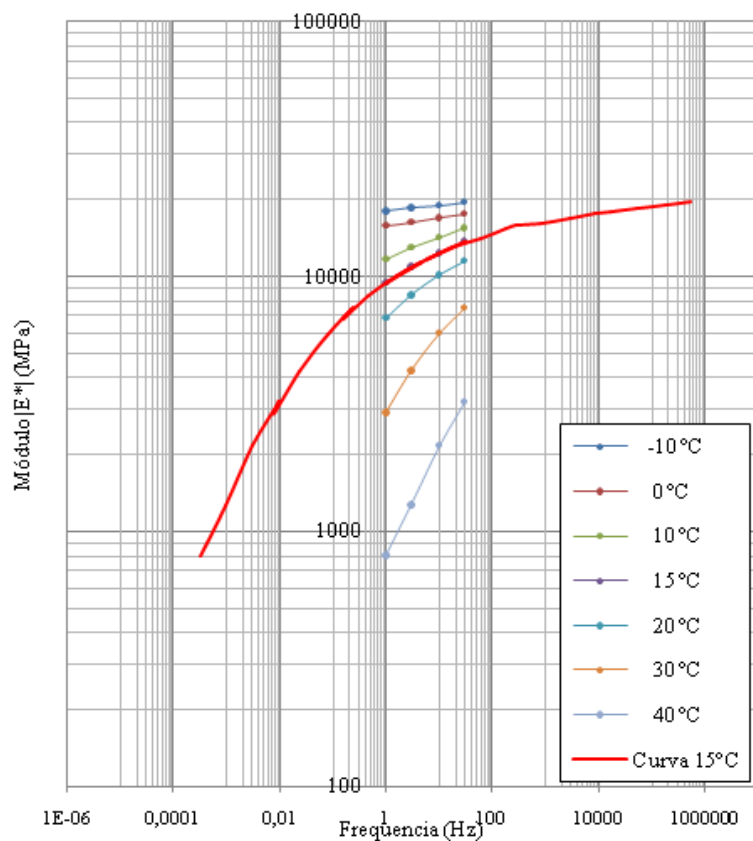
**Figura 108.** Mistura *grave-bitume* representação em curvas isócronas.

A representação no espaço Black permitiu visualizar a variação do ângulo de fase e módulo complexo com a temperatura. Nesta rerepresentação desenhou-se em escala semi-logarítmica a evolução do módulo complexo nas ordenadas com o ângulo de fase nas abscissas, sendo utilizada também para determinar o valor do módulo  $E_{\infty}$  igual a 20159.1MPa, que corresponde ao valor do módulo quando o material é solicitado a baixas temperaturas e freqüência elevada (Figura 109).



**Figura 109.** Mistura *grave-bitume* representação no espaço Black.

A representação seguinte corresponde a curva equivalência temperatura para a mistura *grave-bitume* para uma temperatura de referência de 15°C. A translação é realizada pelo método gráfico (Figura 110).



**Figura 110.** Mistura *grave-bitume* curva equivalência frequência temperatura para 15°C.



## 5.5 ENSAIO DE FADIGA

O ensaio de fadiga foi realizado sob procedimento normativo NF P 98 – 261-1, ensaiando no mínimo seis corpos-de-prova em cada nível de solicitação imposto (deformação controlada). Três níveis de solicitação (deformação controlada) foram avaliados para cada tipo de mistura asfáltica na condição de temperatura de 10°C e 25Hz, e para a mistura de módulo elevado adicionalmente foi realizado ensaios de fadiga a 30°C e 25Hz.

Foi calculada a equação característica da curva de fadiga para cada material nas condições de temperatura do ensaio por regressão linear. Desenhando em escala logarítmica o nível de solicitação nas abscissas *versus* o número de solicitações correspondentes à ruptura nas ordenadas. Conhecendo o valor respectivo da inclinação da curva (b), indicando a suscetibilidade da mistura ao número de solicitações. E determinado estatisticamente as hipérboles de confiança e cálculo da respectiva variação da deformação para um milhão de ciclos ( $\Delta\epsilon_6$ ).

### 5.5.1 Mistura de módulo elevado

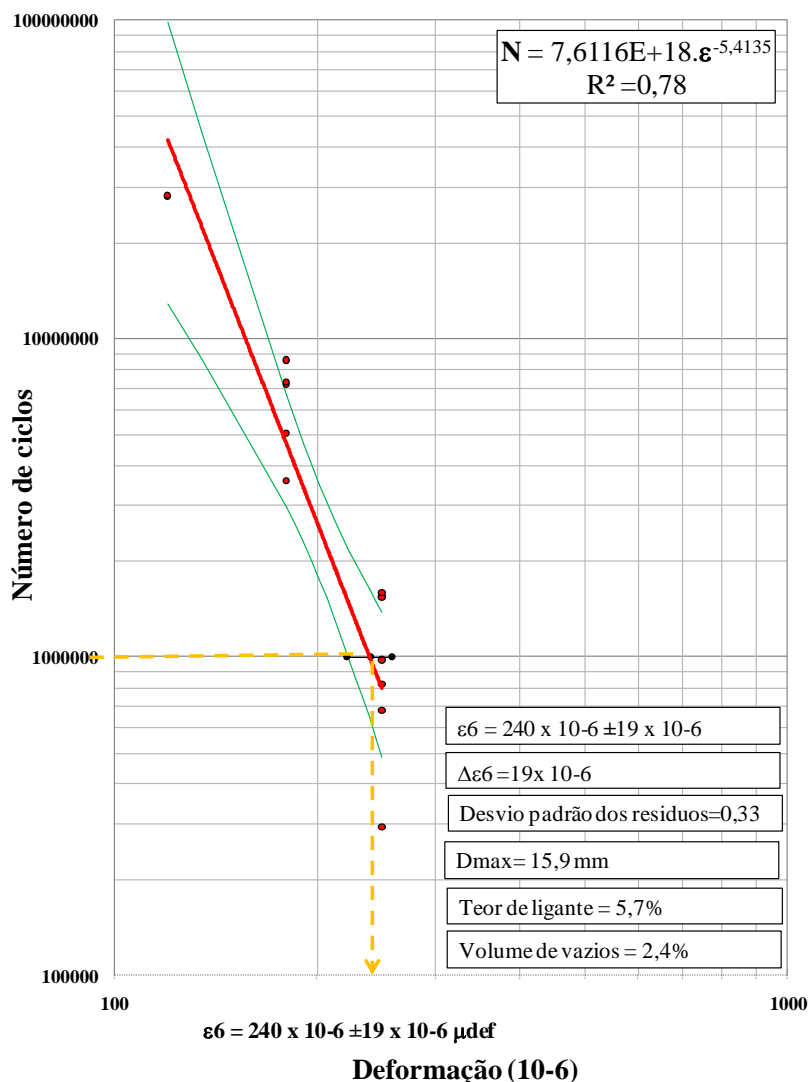
A mistura de módulo elevado foi avaliada inicialmente na condição de temperatura 10°C e 25Hz, por ser considerada crítica para os concretos asfálticos e porque teoricamente ocorre a maior energia perdida. Além disso, é a temperatura estabelecida nas normas francesas.

Estes ensaios foram realizados nos níveis de deformação de 120 $\mu$ def, 180 $\mu$ def e 250 $\mu$ def, desenhando em escala logarítmica a deformação *versus* número de solicitações correspondentes à ruptura para cada corpo-de-prova, na tabela 44 são apresentados os resultados do ensaio de fadiga.

**Tabela 44.** Ensaio de fadiga 10°C e 25Hz mistura de módulo elevado.

| Corpo de Prova | Deformação        | N          | Vv   | Kepsilon |
|----------------|-------------------|------------|------|----------|
| No             | ( $\mu\text{m}$ ) | (ciclos)   | (%)  | (cm-1)   |
| 2,04           | 120               | 27.915.000 | 2,38 | 0,008966 |
| 2,11           | 120               | 28.104.000 | 2,78 | 0,008962 |
| 1,15           | 180               | 8.494.500  | 2,59 | 0,009055 |
| 1,06           | 180               | 7.162.500  | 2,06 | 0,009048 |
| 2,06           | 180               | 7.302.000  | 2,42 | 0,008947 |
| 2,07           | 180               | 3.574.500  | 2,59 | 0,008944 |
| 2,15           | 180               | 8.547.000  | 2,64 | 0,008986 |
| 2,18           | 180               | 5.023.500  | 2,25 | 0,008979 |
| 1,13           | 250               | 97.500     | 2,39 | 0,008996 |
| 1,02           | 250               | 291.000    | 1,96 | 0,009004 |
| 2,16           | 250               | 1.549.500  | 2,59 | 0,009004 |
| 2,09           | 250               | 975.000    | 1,70 | 0,008970 |
| 2,02           | 250               | 678.000    | 2,13 | 0,008961 |
| 2,12           | 250               | 1.531.500  | 2,31 | 0,008941 |
| 2,08           | 250               | 819.000    | 2,54 | 0,008940 |
| 2,03           | 250               | 1.584.000  | 2,37 | 0,008939 |

Somente dois corpos-de-prova foram considerados no nível de deformação de 120 $\mu\text{def}$ , pela longa duração do ensaio e quebra das células de carga, sendo eliminados os corpos-de-prova que não atingiram a ruptura.



**Figura 111.** Curva de fadiga mistura módulo elevado a 10°C e 25Hz.

Nestas condições o material deve ter uma deformação igual ou superior a 130 $\mu\text{def}$  para um nível de solicitação de um milhão de ciclos. Na Tabela 45 são apresentados os valores característicos das curvas de fadiga.

**Tabela 45.** Valores característicos das curvas de fadiga 10°C e 25Hz.

| $\varepsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) | $\Delta\varepsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) | B       | SN   | $R^2$ |
|-------------------------------------|---|---------|------|-------|
| 240                                 | 19  | -5,4135 | 0,33 | 0,78  |

$\varepsilon_6$ , Deformação para um milhão de ciclos;

SN, Desvio padrão dos resíduos.

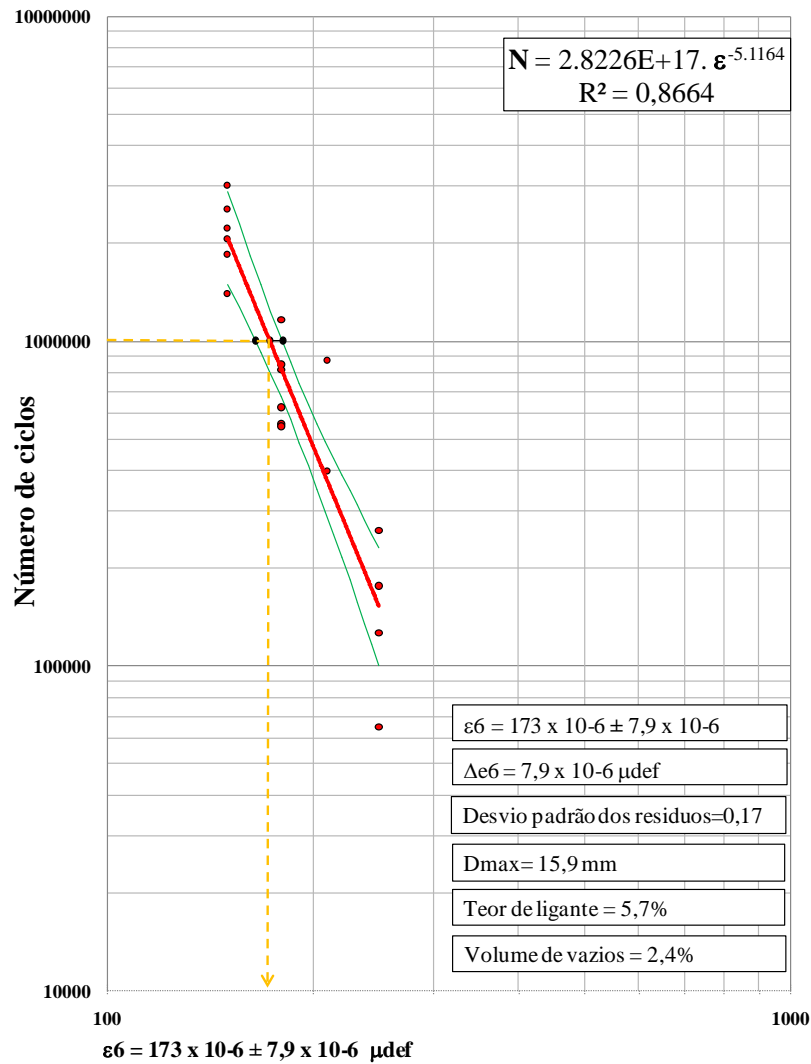
O coeficiente de correlação da curva de fadiga foi 0,78 com um desvio padrão dos resíduos de 0,33 e inclinação da curva igual -5,4135. Apresentando um valor elevado de deformação para um milhão de solicitações ( $\varepsilon_6$ ) igual a  $240 \pm 19 \mu\text{def}$ .

O ensaio de fadiga realizado a 10°C e 25Hz revelou uma elevada resistência à fadiga que se atribui ao comportamento predominantemente elástico causado tanto pela consistência do ligante como pelo nível de temperatura de ensaio, igual a 10°C.

Com o propósito de avaliar o material a outras temperaturas foi realizado o ensaio para a mistura de módulo elevado na condição de temperatura de 30°C e 25Hz, correspondente à temperatura de maior módulo imaginário represada no plano Cole-Cole, realizando os ensaios para três níveis de solicitação 150 $\mu\text{def}$ , 180 $\mu\text{def}$  e 250 $\mu\text{def}$ , evidenciando a redução da deformação correspondente para um milhão de solicitações para  $173 \pm 7,9 \mu\text{def}$ , coeficiente de correlação igual a 0,866 e desvio padrão dos resíduos igual a 0,17 (Figura 112).

**Tabela 46.** Ensaio de fadiga 30°C e 25Hz mistura de módulo elevado.

| Corpo de Prova | Deformação | N         | Vv   | K épsilon |
|----------------|------------|-----------|------|-----------|
| (No)           | (µm)       | (ciclos)  | (%)  | (cm-1)    |
| 1,05           | 150        | 1.846.500 | 2,37 | 0,009035  |
| 1,20           | 150        | 3.003.000 | 2,22 | 0,009025  |
| 2,05           | 150        | 1.393.500 | 1,95 | 0,009023  |
| 2,20           | 150        | 2.545.500 | 2,14 | 0,009013  |
| 2,01           | 150        | 2.064.000 | 2,97 | 0,009013  |
| 2,19           | 150        | 2.217.000 | 2,07 | 0,009012  |
| 1,01           | 180        | 813.000   | 2,74 | 0,009032  |
| 1,09           | 180        | 553.500   | 2,67 | 0,009097  |
| 1,17           | 180        | 544.500   | 2,21 | 0,009039  |
| 1,19           | 180        | 844.500   | 2,79 | 0,009035  |
| 1.03           | 180        | 1.158.000 | 1,76 | 0,009097  |
| 1.16           | 180        | 624.000   | 2,80 | 0,009079  |
| 2,14           | 210        | 397.500   | 2,49 | 0,009006  |
| 2,10           | 210        | 871.500   | 1,53 | 0,008877  |
| 2,13           | 250        | 126.000   | 1,84 | 0,008927  |
| 1,18           | 250        | 259.500   | 2,33 | 0,008932  |
| 1.04           | 250        | 64.500    | 2,50 | 0,009009  |
| 1.12           | 250        | 175.500   | 2,55 | 0,009022  |



**Deformação (10-6)**

**Figura 112.** Curva de fadiga mistura módulo elevado a 30°C e 25Hz.

Na Tabela 47 são apresentados o resultado da curva de fadiga medido a 30°C e 25Hz.

**Tabela 47.** Valores característicos das curvas de fadiga a 30°C e 25Hz.

| $\varepsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) | $\Delta\varepsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) | b       | SN   | $R^2$  |
|-------------------------------------|---|---------|------|--------|
| 173                                 | 7,9                                       | -5,1164 | 0,17 | 0,8664 |

$\varepsilon_6$ , Deformação para um milhão de ciclos;

SN, Desvio padrão dos resíduos.

### 5.5.2 Mistura grave-bitume

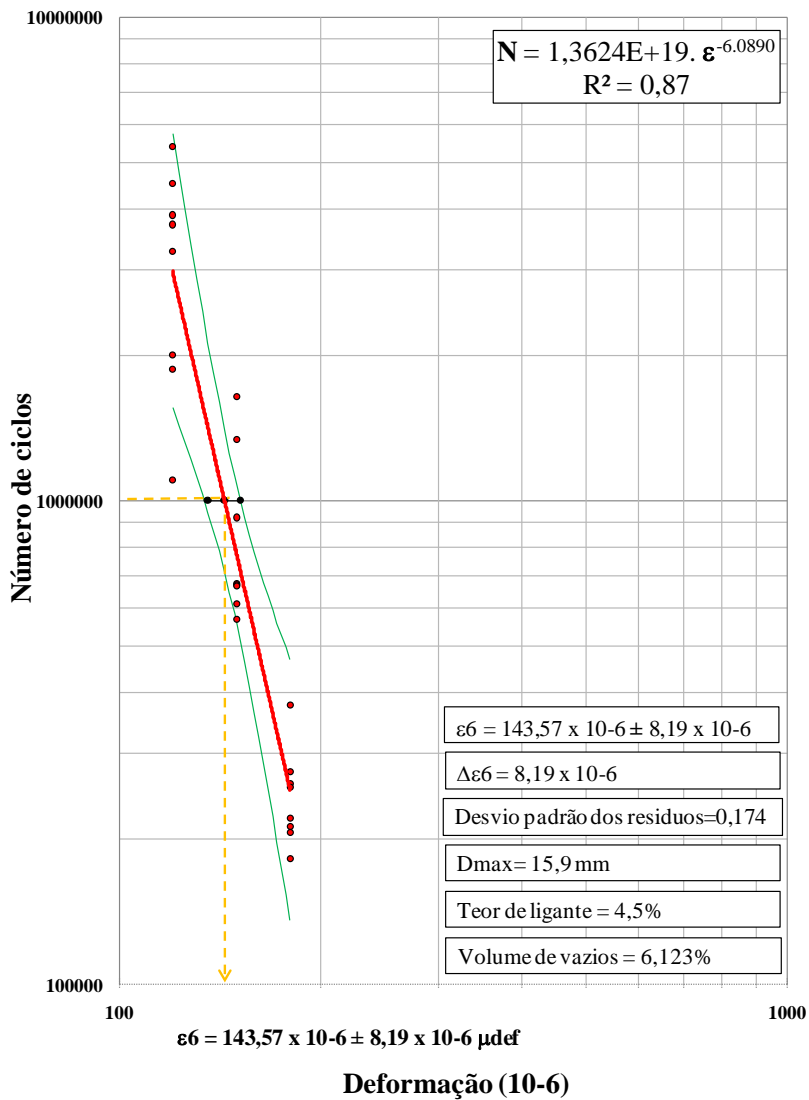
A mistura *grave-bitume* foi avaliada igualmente para três níveis de solicitação (deformação controlada): 120 $\mu\text{def}$ , 150 $\mu\text{def}$  e 180 $\mu\text{def}$ , sendo avaliados em cada nível oito corpos-de-prova, na Tabela 48 são apresentados os resultados do ensaio de fadiga.

Uma vez ensaiados os corpos-de-prova, foi desenhada, em escala logarítmica, o nível de solicitação *versus* número de ciclos correspondentes à ruptura, determinando por regressão a curva de fadiga do material com um coeficiente de correlação 0,843. O valor correspondente de deformação para um milhão de solicitações é de 143,57 $\pm$ 8,19 $\mu\text{def}$  e o desvio padrão dos resíduos 0,17 e a inclinação da curva de fadiga igual a -6,089 (Figura 113).

**Tabela 48.** Ensaio de fadiga 10°C e 25Hz mistura *grave-bitume*.

| Corpo de Prova | Deformação | N         | Vv   | K épsilon |
|----------------|------------|-----------|------|-----------|
| (No)           | (µm)       | (ciclos)  | (%)  | (cm-1)    |
| 1,11           | 120        | 2.002.500 | 7,21 | 0,00902   |
| 1,09           | 120        | 3.895.500 | 5,70 | 0,00901   |
| 2,12           | 120        | 4.519.500 | 6,33 | 0,00900   |
| 1,16           | 120        | 3.279.000 | 6,42 | 0,00900   |
| 1,19           | 120        | 3.724.500 | 6,45 | 0,00899   |
| 1,13           | 120        | 1.867.500 | 6,38 | 0,00899   |
| 2,17           | 120        | 5.403.000 | 6,80 | 0,00905   |
| 1,14           | 120        | 1.102.500 | 6,04 | 0,00904   |
| 2,18           | 150        | 673.500   | 5,91 | 0,00897   |
| 1,17           | 150        | 1.641.000 | 5,82 | 0,00897   |
| 1,05           | 150        | 568.500   | 6,15 | 0,00896   |
| 2,09           | 150        | 1.339.500 | 5,83 | 0,00896   |
| 1,04           | 150        | 612.000   | 6,09 | 0,00898   |
| 2,05           | 150        | 922.500   | 6,21 | 0,00897   |
| 1,07           | 150        | 670.500   | 5,66 | 0,00896   |
| 1,02           | 150        | 666.000   | 5,70 | 0,00896   |
| 2,04           | 180        | 274.500   | 5,79 | 0,00902   |
| 2,19           | 180        | 211.500   | 6,08 | 0,00902   |
| 2,02           | 180        | 378.000   | 6,20 | 0,00902   |
| 1,18           | 180        | 205.500   | 5,95 | 0,00902   |
| 1,01           | 180        | 181.500   | 6,63 | 0,00894   |
| 1,03           | 180        | 220.500   | 6,43 | 0,00893   |
| 2,14           | 180        | 259.500   | 6,09 | 0,00893   |
| 2,08           | 180        | 255.000   | 5,76 | 0,00891   |





**Figura 113.** Curva de fadiga mistura *grave-bitume* a 10°C e 25Hz.

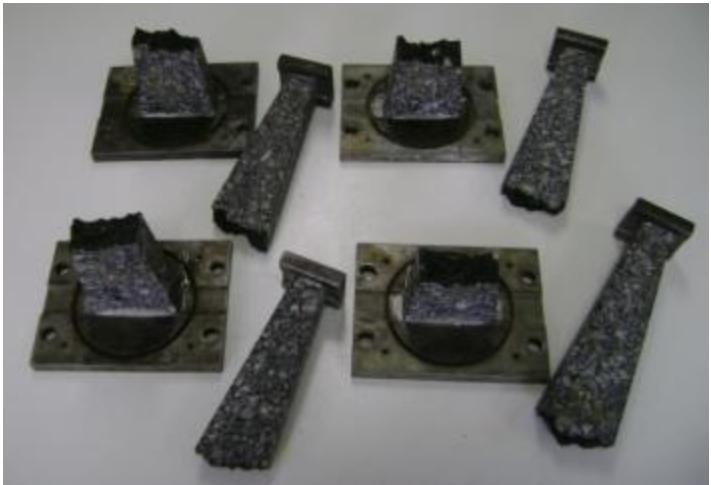
Na Tabela 49 são apresentados os valores característicos da curva de fadiga realizada a uma temperatura de 10°C e frequência de 25Hz.

**Tabela 49. Valores característicos das curvas de fadiga a 10°C e 25Hz.**

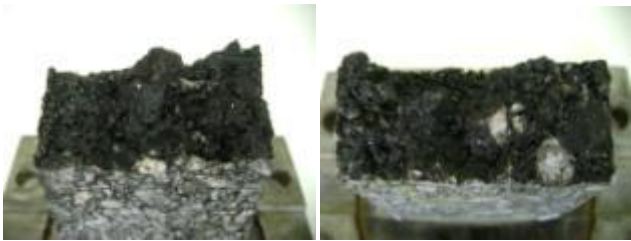
| $\varepsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) | $\Delta\varepsilon_6$ ( $\mu\text{def}$ ) | b      | SN     | $R^2$ |
|-------------------------------------|---|--------|--------|-------|
| 143,57                              | 8,19                                      | -6,089 | 0,1736 | 0,87  |

$\varepsilon_6$ , Deformação para um milhão de ciclos;  
SN, Desvio padrão dos resíduos.

A ruptura geral, tanto das misturas de módulo elevado como as misturas *grave-bitume*, deu-se de diferentes formas tanto pelos granulares como pelas interfaces entre o ligante e o granular (Figura 114) e (Figura 115).



**Figura 114.** Ruptura geral dos de corpos-de-prova aceitos.



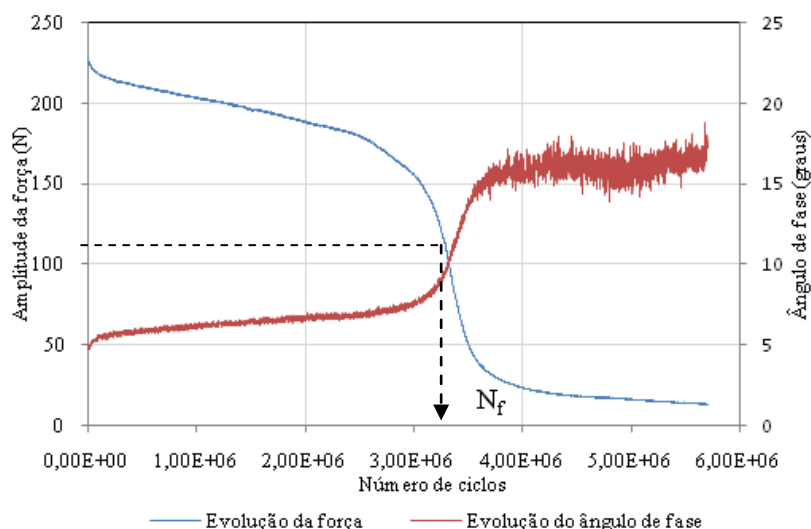
(a)

(b)

**Figura 115.** Superfície de ruptura no ensaio de fadiga (a) pelo contorno dos granulares (b) ruptura com quebra dos granulares.

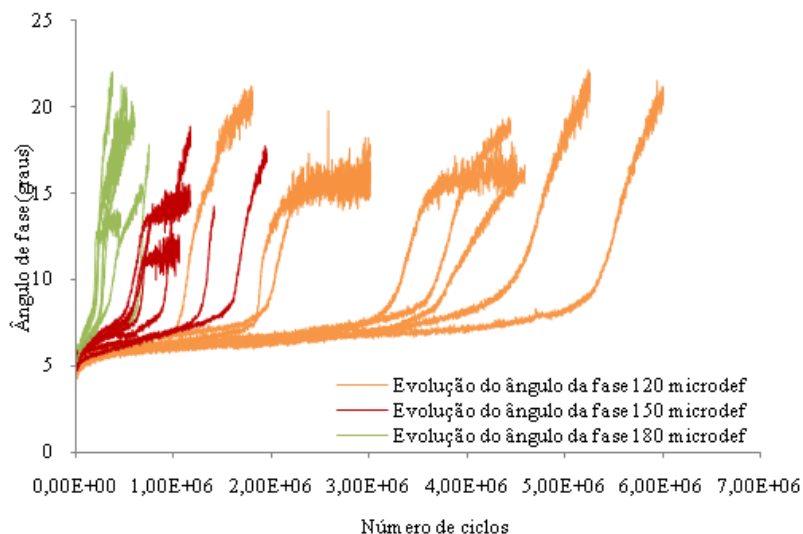
Durante o ensaio de fadiga, com deformação controlada, a amplitude da força diminui com o aumento do número de ciclos devido à perda de rigidez do material. O comportamento viscoelástico do material evidencia-se pelo aumento do ângulo de fase entre a força e a deformação. À medida que o número de ciclos aumenta o ângulo de fase também aumenta.

Após da ruptura do corpo-de-prova, observa-se uma distorção no sinal da medição do ângulo de fase devido à ruptura do material, A figura 78 ilustra a evolução do ângulo de fase e a força de maneira geral, durante o ensaio de fadiga (Figura 116).



**Figura 116.** Tendência do ângulo de fase e força no ensaio de fadiga.

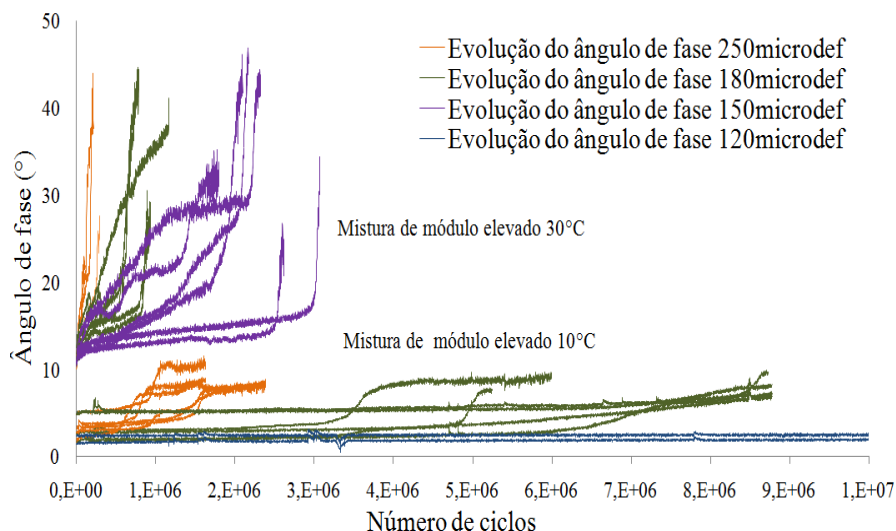
Com o aumento do nível de deformação a vida em fadiga dos corpos-de-prova diminui, havendo uma dispersão dos resultados para a mistura nos níveis de deformação ensaiados. A Figura 117 ilustra a evolução do ângulo de fase durante o ensaio de fadiga para a mistura *grave-bitume* para as deformações de 120  $\mu$ def, 150  $\mu$ def, 180  $\mu$ def em função do nível de deformação.



**Figura 117.** Evolução do ângulo de fase no ensaio de fadiga para mistura *grave-bitume*.

Os valores iniciais do ângulo de fase para a mistura *grave-bitume* no ensaio de fadiga a 10°C e 25Hz esteve entre 4,2° a 6,2°. Para a mistura de módulo elevado a 10°C e 25Hz esteve entre 1,5° e 4,9° no início do ensaio, ou seja, observa-se um comportamento predominantemente elástico. Para a mistura de módulo elevado no ensaio de fadiga a 30°C e 25Hz o ângulo de fase inicial mudou para o conjunto de corpos de prova entre 10,1° e 13,6°.

Na figura 118 são ilustrados a evolução do ângulo de fase para a mistura de módulo elevado ensaiada a 10°C e 30°C



**Figura 118.** Evolução do ângulo de fase no ensaio de fadiga para mistura de módulo elevado.

A relevância que se dá ao ângulo de fase deve-se a que este é um indicativo do grau de viscoelástidade do material lembrando que para um material puramente elástico o ângulo de fase é zero e para um material puramente viscoso é igual a 90°C.



## 6 EXPLORAÇÃO DE RESULTADOS

É realizada a análise dos resultados laboratoriais em relação à compacidade, a sensibilidade à água, a deformação permanente, o módulo complexo e a resistência à fadiga. São comparadas as duas misturas asfálticas em relação ao desempenho durante as etapas de formulação.

É calibrado o modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh a partir do ensaio de módulo complexo. É realizado o dimensionamento de uma estrutura hipotética, sendo que primeiramente é realizado o dimensionamento para uma temperatura de referência de 15°C e a lei de fadiga para a temperatura de 10°C. Considerando que a temperatura crítica das misturas estudadas desloca-se para a temperatura de 30°C, é realizado um segundo dimensionamento considerado a temperatura de referência igual a 30°C, evidenciando o efeito da temperatura na espessura do pavimento. O análise da estrutura do pavimento é realizada com o programa *ViscoRoute*, que permite considerar o comportamento viscoelástico das camadas betuminosas e a carga em movimento a velocidade constante.

### 6.1 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO POR CISALHAMENTO GIRATÓRIO (PCG)

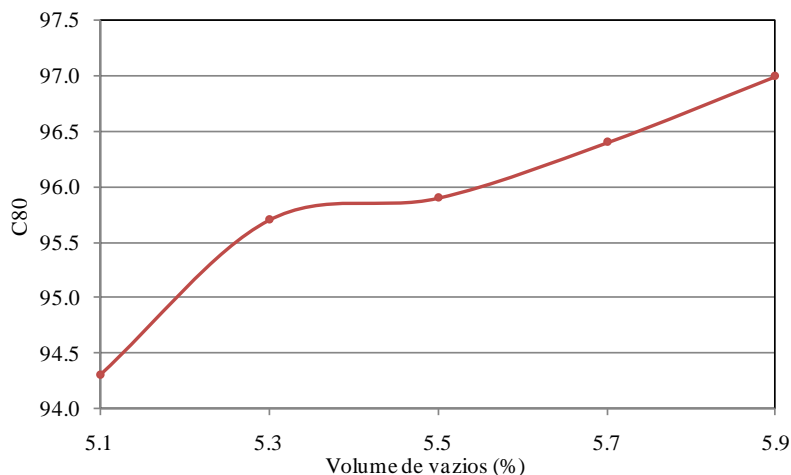
O ensaio permitiu avaliar a compacidade das misturas asfálticas em função do teor de ligante para ambas as misturas asfálticas. A habilidade com que as misturas asfálticas deixam-se compactar permitiu verificar a consistência das fórmulas avaliadas, densificando de maneira satisfatória para a composição granulométrica e teores de ligantes asfálticos testados. Verificou-se a evolução da compacidade com o aumento da energia de compactação em função do número de giros com uma boa homogeneidade dos resultados, e evidenciou-se a influência do teor de ligante com pequenas mudanças deste.

#### 6.1.1 Mistura de módulo elevado

A evolução do volume de vazios com o aumento gradativo da energia de compactação é um indicativo de que a mistura asfáltica possivelmente não terá problemas no que diz respeito o afundamento por trilha de roda, já que no primeiro giro não houve uma redução súbita do volume de vazios. Pelo contrário, este evoluiu de maneira relativamente constante.

A partir dos 40 giros, aproximadamente, houve uma mudança na inclinação da curva de compactação para os teores acima de 5,3% de ligante. Este comportamento pode-se interpretar em função da compacidade, que varia em menor proporção com o aumento da energia de compactação, mudando conseqüentemente a inclinação (K) da curva. Ou seja, há uma melhor acomodação dos granulares devido ao excesso de ligante, o que é evidenciado pela mudança de inclinação da curva de compactação.

A influência do teor de ligante verifica-se pela tendência das curvas de compactação sendo estas aproximadamente paralelas entre si. Esta tendência também pode ser igualmente visualizada ao desenhar para a compacidade no nível dos 80 giros com o incremento de ligante (Figura 119).

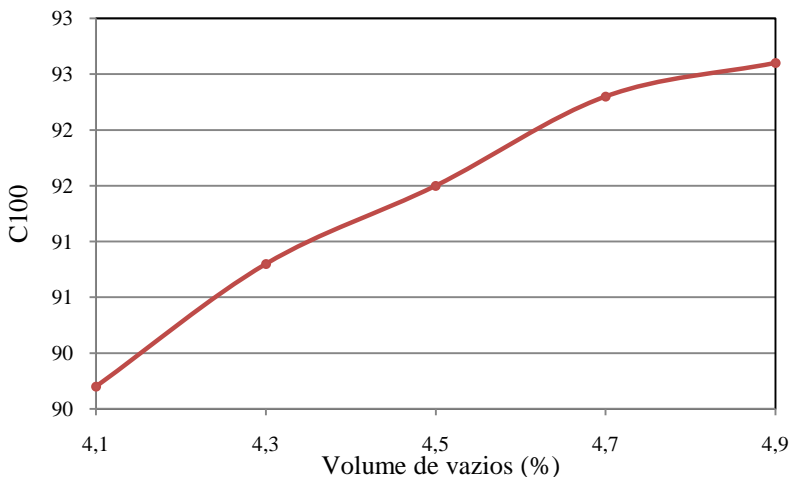


**Figura 119.** Influência do teor de ligante na compacidade no nível dos 80 giros.

### 6.1.2 Mistura *grave-bitume*

As misturas obtiveram valores de compacidade baixos entre 89,7% a 92,6%. Na medida em que a energia de compactação aumentou, houve uma evolução gradativa quase constante do volume de vazios, sem mudanças significativas na inclinação das curvas de compactação. Os valores de volume de vazios foram satisfatórios, isto é, inferiores a 10% no nível dos 100 giros. A curva de evolução da compacidade no nível dos 100 giros com o teor de ligante é ilustrado na (Figura 120).





**Figura 120.** Influência do teor de ligante na compactação no nível dos 100 giros.

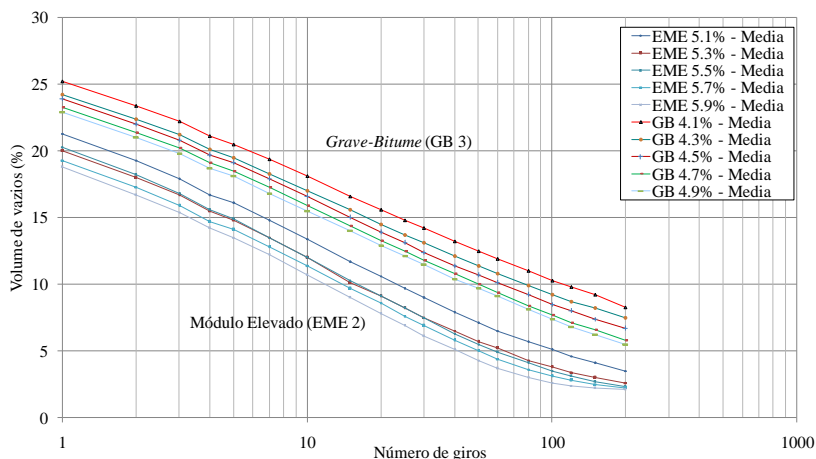
### 6.1.3 Comparação das misturas

No que diz respeito à densificação das misturas asfálticas, a mistura *grave-bitume* apresentou volume de vazios muito superiores à mistura de módulo elevado, sendo coerente com os critérios de formulação.

Quanto à compactação e volume de vazios obtidos para os teores analisados das misturas de módulo elevado e *grave-bitume*, houve uma grande diferenciação quanto ao tipo de mistura, resultado consistente com as especificações estabelecidas nas respectivas normas NF P 98 – 140 e NF P 98 – 138.

A inclinação das curvas de compactação das misturas *grave-bitume* é relativamente constante, em comparação com a densificação da mistura de módulo elevado.

As duas misturas diferenciam-se na percentagem de material passante na peneira n°200 (sendo 7% para a mistura de módulo elevado e 5% para a mistura *grave-bitume*), nos tipos de ligantes, nos teores de ligante e nas temperaturas de compactação. A evolução das curvas de densificação das duas misturas, módulo elevado (EME) e *grave-bitume* (GB), podem ser comparadas na (Figura 121).



**Figura 121.** Comparação das misturas asfálticas.

As tendências semelhantes da inclinação das curvas podem ser explicadas por manter-se o mesmo diâmetro máximo para as duas misturas asfálticas, tendo pouca influência a diferença de material passante na peneira n°200, sendo para a mistura de módulo elevado 7% e para a mistura *grave-bitume* 5%. O parâmetro diferenciador é o teor de ligante. Na medida em que o teor de ligante aumenta, a mistura ganha trabalhabilidade e há uma melhor acomodação do esqueleto granular que aumenta sua densificação.

## 6.2 SENSIBILIDADE À ÁGUA NO ENSAIO DURIEZ

A verificação da sensibilidade à água no ensaio Duriez permitiu evidenciar a influência do teor de ligante na redução da tensão de ruptura. Apesar de não ser um ensaio severo em relação às temperaturas de condicionamento, houve uma redução da tensão de ruptura em função do teor de ligante.

### 6.2.1 Mistura de módulo elevado

O ensaio permitiu observar o aumento da tensão de ruptura para os corpos-de-prova condicionados a 18°C e umidade relativa de 50% com o aumento do teor de ligante com uma evolução crescente desta até o teor de ligante de 5,7%. A partir deste valor houve um decréscimo da

resistência. Este comportamento não se evidenciou para os corpos-de-prova sob imersão na água, onde os valores de resistência foram um pouco menores e de maneira sempre crescentes. Ao incrementar o teor de ligante, há uma maior dificuldade da água penetrar nos vazios do concreto asfáltico e causar deterioração na interface entre o granular e o asfalto.

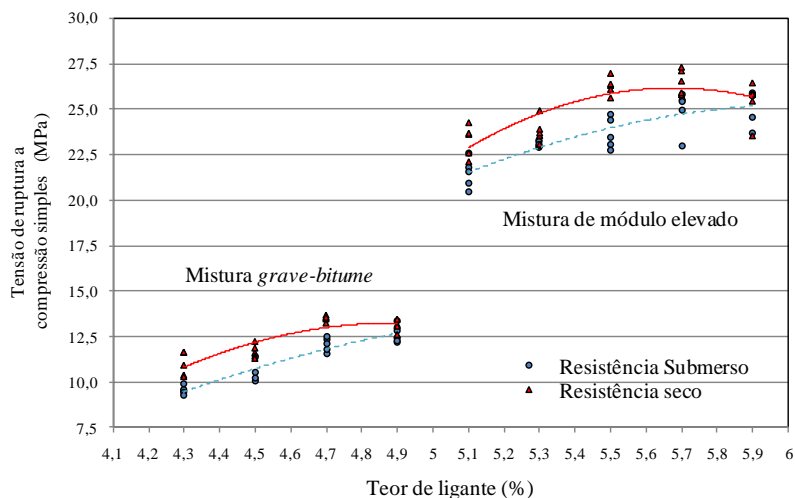
### **6.2.2 Mistura *grave-bitume***

A evolução da tensão de ruptura para as misturas condicionadas a 18°C e umidade relativa de 50% e condicionadas na água foi verificada com valores de  $r/R$  variando entre 0,86 a 0,89. Estes valores mostram que há uma maior ação da água entre as interfaces do ligante devido tanto ao conteúdo de ligante como à compacidade das misturas que permite que a água penetre e afete seu comportamento. Não entanto, os valores de tensão de ruptura, tanto para os corpos-de-prova condicionados na água como os não condicionados na água, foram muito menores, atribuído à rigidez da mistura asfáltica em função da consistência do ligante asfáltico.

### **6.2.3 Comparação das misturas**

A compacidade da mistura *grave-bitume* foi muito menor conseqüentemente um volume de vazios maior, evidenciado nas alturas atingidas dos corpos de prova para as mesmas condições de compactação.

A mistura de módulo elevado resultou em valores muito superiores de tensão de ruptura a compressão simples que as misturas de *grave-bitume*, tanto para as misturas condicionadas na água e como as não condicionadas na água. Os valores de tensão de ruptura dos corpos-de-prova sem condicionamento na água variou entre 21,74MPa e 24,98MPa para os teores de ligantes de 5,1% e 5,9%, respectivamente. Este fato pode ser atribuído tanto a maior compacidade conseguida para esta mistura, como a elevada consistência do ligante. Além disso, constata-se pouca variação da perda de resistência pela ação da água com valores compreendidos entre 0,91 e 0,98. Para a mistura *grave-bitume* os valores de tensão de ruptura foram consideravelmente menores com valores variando entre 9,48MPa e 12,67MPa para os teores de ligantes 4,3% e 4,9%, respectivamente, havendo uma maior influência da água no comportamento do material (Figura 122).



**Figura 122.** Comparação da resistência a compressão simples das misturas.

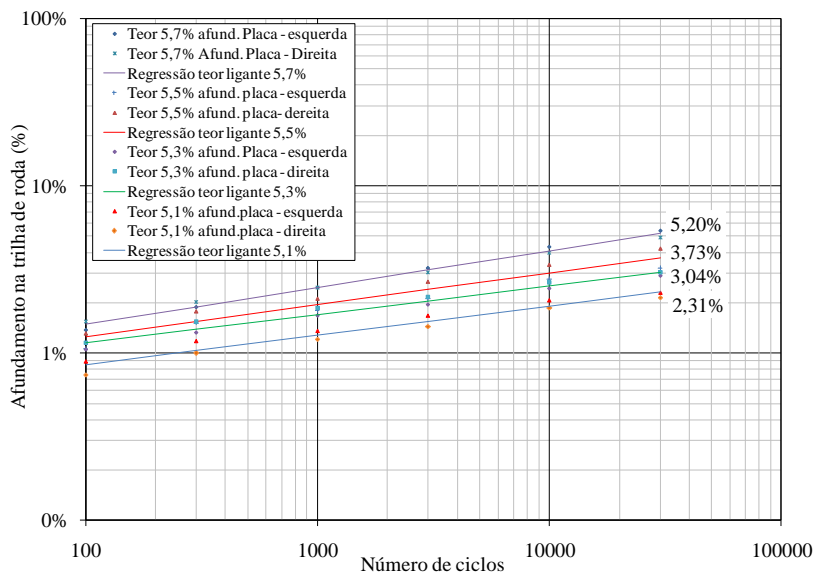
### 6.3 ENSAIO DE DEFORMAÇÃO PERMANENTE

As misturas mostraram uma evolução da profundidade por deformação permanente com o incremento do teor de ligante. Para as misturas ensaiadas obtiveram-se resultados satisfatórios em relação aos parâmetros de formulação. Em cortes realizados no centro das placas observou-se uma boa distribuição dos grãos dentro da massa de concreto asfálticos, sendo que esta se deu pela homogeneização da mistura asfáltica antes da compactação.

#### 6.3.1 Mistura de módulo elevado

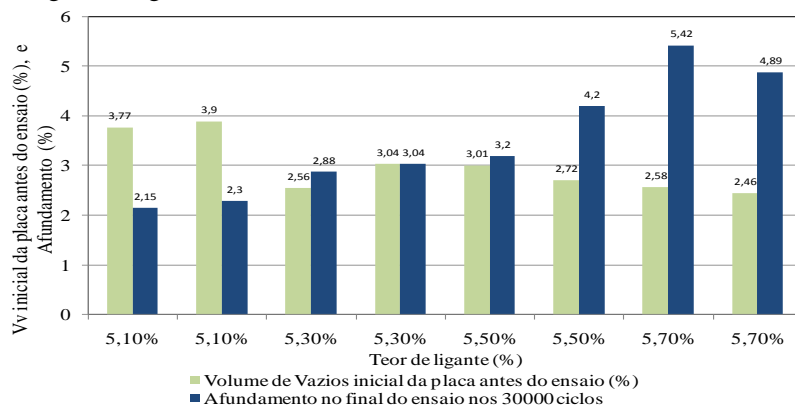
A consistência do ligante permitiu valores de afundamentos inferiores aos que se conseguiriam com ligantes convencionais, considerando que os teores de ligantes avaliados são elevados. A elevada rigidez do ligante faz com que este se comporte, ante os esforços repetidos na temperatura de 60°C, menos fluido, assegurando uma menor deformação do material.

Ao comparar as curvas de deformação permanente para cada teor de ligante, mostra-se como aumenta a deformação com o teor de ligante. No início do ensaio existe também uma evolução, e este comportamento é atribuído ao incremento no teor de ligante (Figura 123).



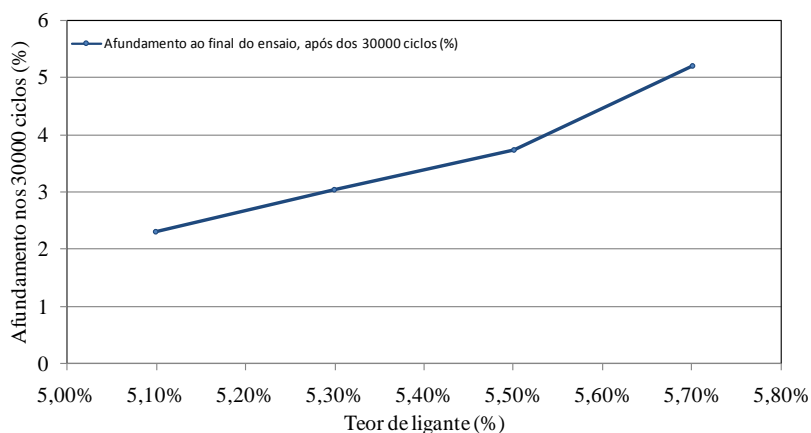
**Figura 123.** Mistura de módulo elevado, variação do afundamento em função do teor de ligante.

Ao desenhar o volume de vazios inicial das placas antes do ensaio conjuntamente com o afundamento por deformação permanente após do ensaio. Para a placa com menor volume de vazios antes do ensaio, deu-se a maior afundamento, dando o mecanismo de deformação ante os esforços repetidos pela fluência do material devido ao excesso de ligante (Figura 124).



**Figura 124.** Evolução da deformação permanente por placa com o incremento do teor de ligante.

A deformação do material é um fenômeno complexo, onde muitas são as variáveis que intervêm no processo: o tamanho máximo do material, o teor de finos, a composição granulométrica, o teor e tipo de ligante. Estas misturas possuem um teor de ligante um pouco mais elevado devido à consistência, porém deve-se levar em conta seu efeito no comportamento mecânico do material durante a formulação. A tendência do afundamento com o incremento do teor de ligante calculada por regressão para cada par de placas no nível dos 30000 ciclos, junto com o volume de vazios médio inicial das duas placas por teor de ligante antes do início do ensaio, é ilustrado na (Figura 125).



**Figura 125.** Afundamento nos 30000 ciclos, com o incremento do teor de ligante.

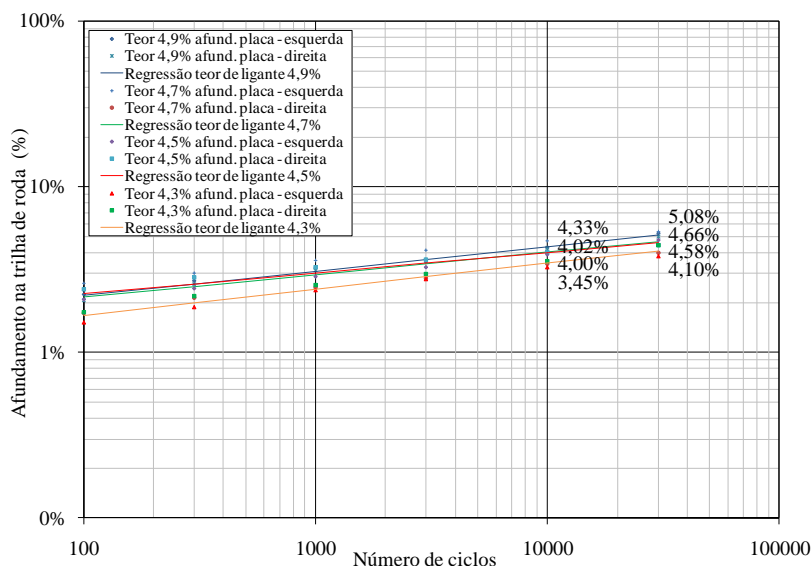
### 6.3.2 Mistura *grave-bitume*

Estas misturas apresentaram excelente comportamento no que diz respeito ao afundamento por deformação permanente. Esta mistura asfáltica tem requerimentos menores avaliando a profundidade nos 10000 ciclos. No entanto, as misturas foram avaliadas até os 30000 ciclos com valores muito satisfatórios, inferiores a 10%.

No nível dos 30000 ciclos para todas as misturas ensaiadas obteve-se valores inferiores ao afundamento no que deveria ser nos 10000 ciclos. Um dos fatores diferenciais é o tipo de ligante com penetração  $37 \times 10^{-1} \text{ mm}$  e ponto de amolecimento igual a  $57^{\circ}\text{C}$ . Apesar de não ser um ligante de consistência tão elevada, este foi um parâmetro

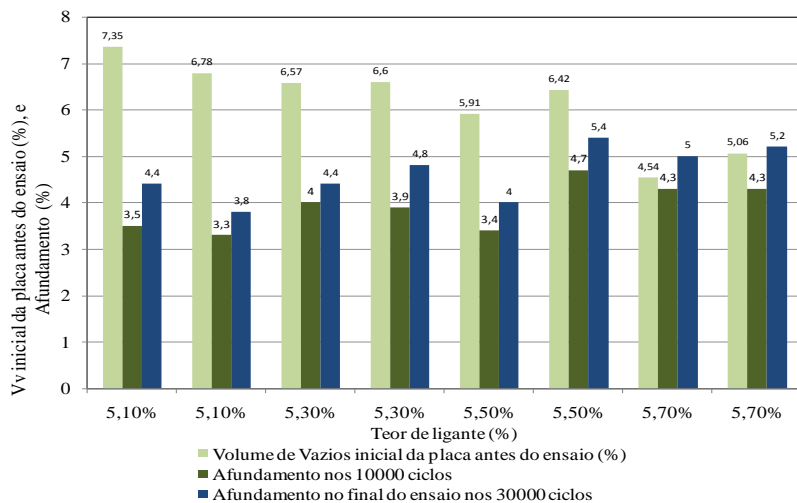
determinante devido a que a mistura apresentam um volumem de vazios elevados, entre 4,3% até 7,35%.

Ao comparar as curvas das placas ensaiadas da mistura *grave-bitume*, observa-se um intervalo de variação do afundamento por deformação permanente menor, variando entre 4,10% a 5,08% no nível dos 30000 ciclos (Figura 126).

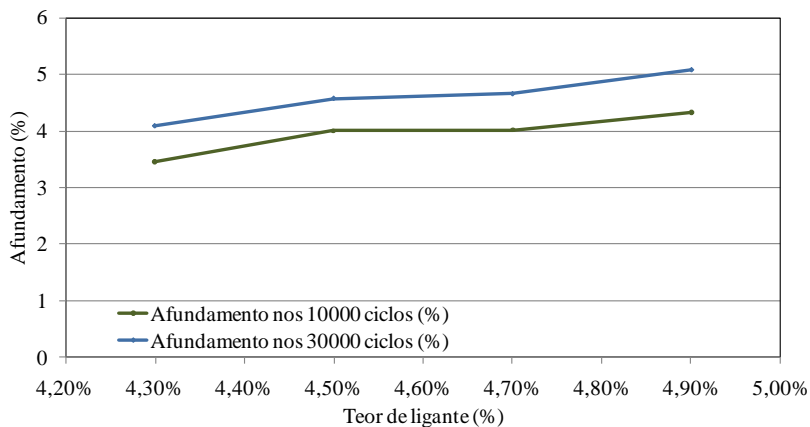


**Figura 126.** Comparação do ensaio de deformação permanente, mistura *grave-bitume*.

Foi possível verificar a variação de deformação com o incremento do teor de ligante, onde os incrementos de afundamento por deformação permanente foram menores entre teores de ligantes, havendo uma maior resistência pelo atrito entre as partículas e pela consistência do ligante, na figura 127, é ilustrado o volume de vazios inicial de cada placa antes do ensaio e o afundamento por deformação permanente após do ensaio no nível dos 30000 ciclos.



**Figura 127.** Evolução da deformação permanente com o incremento do teor de ligante.



**Figura 128.** Afundamento no nível dos 10000 ciclos e 30000, com o incremento do teor de ligante.

### 6.3.3 Comparação das misturas

Evidencia-se neste ensaio a influência do tipo de ligante e teor de ligante no comportamento sob condições severas de condicionamento. Na mistura de módulo elevado o ligante corresponde a resíduo de vácuo



com penetração de  $10 \times 10^{-1}$  mm. Para a misturas *grave-bitume* a consistência do ligante é consideravelmente menor  $37 \times 10^{-1}$  mm.

Este fato somado a composição do esqueleto granular, explica porque, apesar de ser duas misturas diferentes, o afundamento por deformação permanente da mistura *grave-bitume* para o teor de ligante de 4,9% foi muito similar àquele do teor de ligante de 5,7% de módulo elevado. Estando em 5,08% e 5,2% para cada mistura respectivamente, no nível dos 30000 ciclos. Isto é a mistura *grave-bitume* com percentagem de vazios maior e ligante de menor consistência, foi muito parecido com a mistura de módulo elevado com um maior teor de ligante com uma consistência maior.

A dispersão dos resultados da mistura *grave-bitume* se atribui a natureza e ao tipo de material, onde a percentagem de vazios é um pouco mais elevada em relação à de módulo elevado. Para a mistura *grave-bitume* o afundamento por deformação permanente variou entre 4,1% para o teor de ligante de 4,3% e 5,1% para o teor de ligante de 4,9%. Para a mistura de módulo elevado 2,3% para o teor de ligante de 5,1% e 5,2% para o teor de ligante de 5,7%. A influência do teor de ligante e compacidade no comportamento da mistura no ensaio de deformação permanente evidencia-se também nos teores de ligantes mínimos avaliados, sendo muito maior o afundamento para a mistura *grave-bitume* que para a mistura de módulo elevado. Fato que constata a influência da consistência do ligante para assegurar na deformação permanente.

## 6.4 ENSAIO DE MÓDULO COMPLEXO

O ensaio de módulo complexo permitiu avaliar a reologia das misturas estudadas através das representações gráficas das componentes do módulo e o ângulo de fase.

O estudo da rigidez da mistura asfáltica, em um espectro amplo de temperaturas e frequências, permitiu visualizar melhor seu comportamento e definir valores de módulo para serem aplicados no dimensionamento, sendo o valor de módulo utilizado dependente da temperatura equivalente do local e frequência representativa.

As misturas ensaiadas apresentaram valores de temperatura crítica diferente às encontradas por outros pesquisadores.

DOMEC, (2003) encontrou que para os concretos asfálticos a temperatura crítica tanto no ensaio de módulo complexo como no ensaio de fadiga, é a correspondente a 10°C. Ressalta-se que em seus ensaios o ligante utilizado foi CAP50/70. Nas representações no espaço Black de

OLARD, (2003) observa-se que há uma menor variação do ângulo de fase para a mistura formulada com ligante 10/20, mostrando também que para superpor as curvas equivalência temperatura com uma mistura de referência com ligante 50/70 a 10°C é necessário realizar a translação a uma temperatura de 20°C.

#### **6.4.1 Misturas de módulo elevado**

A parcela real do módulo complexo nas baixas temperaturas foi muito superior à parcela viscosa. Observou-se que na temperatura de -10°C a componente imaginária ficou muito próximo de zero, próximo a um comportamento fortemente elástico do material.

Observa-se também, que nas baixas temperaturas os pontos experimentais ficaram mais próximos, ou seja, há uma menor influência da frequência, e nas altas temperaturas ficaram mais distantes. Na medida em que a temperatura aumenta o ângulo de fase aumenta e conseqüentemente a parcela viscosa também aumenta. No plano Cole-Cole observou-se uma translação da temperatura teoricamente crítica em relação das misturas convencionais para 30°C.

Nesta temperatura acontece a maior perda de energia e, conseqüentemente, o maior módulo viscoso. Esta situação é consistente considerando que se trata de um ligante de elevada consistência e nas baixas temperaturas o comportamento tende a ser elástico.

As observações anteriores permitem mostrar o quanto o comportamento reológico das misturas asfálticas é fortemente influenciado pela natureza e consistência do ligante.

#### **6.4.2 Mistura *grave-bitume***

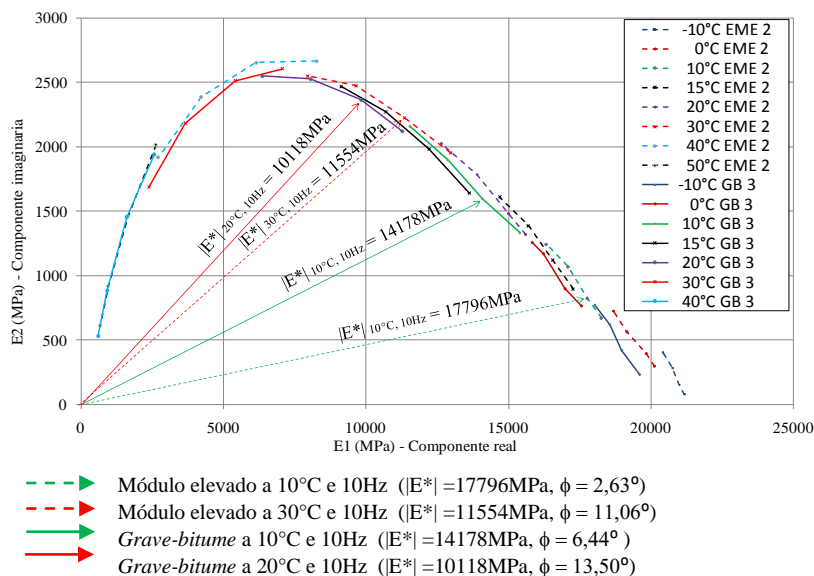
A representação no plano Cole-Cole permitiu evidenciar a maior susceptibilidade térmica das misturas asfálticas, com módulo imaginário E2 maior na temperatura dos 20°C.

A mistura *grave-bitume* apresentou uma menor rigidez. Na representação no plano Cole-Cole houve uma translação do valor de temperatura crítica para a mistura *grave-bitume* esteve em torno de 15°C a 20°C.

#### **6.4.3 Comparação entre as misturas**

A viscoelasticidade dos concretos asfálticos é uma propriedade em função da natureza do ligante quanto o ligante é mais duro menos

susceptível termicamente, porem a partir de determinado nível de temperatura aprecia-se que este se torna mais viscoso, este comportamento é apresentado na (Figura 129).



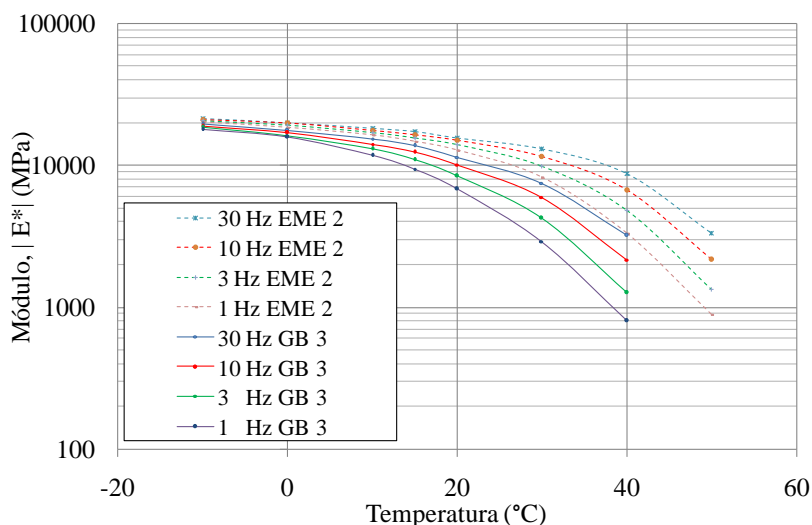
**Figura 129.** Comparação do módulo complexo das misturas asfálticas em no plano Cole-Cole.

Ao desenhar no plano Cole-Cole as componentes do módulo complexo verifica-se a transladação das temperaturas. As linhas pontilhadas correspondem à mistura de módulo elevado e as linhas contínuas à mistura *grave-bitume*. A seta verde-pontilhada representa o vetor módulo na temperatura de 10°C e na frequência de 10Hz. Teoricamente esta curva deveria estar na posição do vetor vermelho-pontilhado (30°C e frequência de 10Hz) ou próximo desta posição. Ou seja, houve um deslocamento da temperatura teoricamente crítica de 10°C para 30°C.

Ao comparar as curvas da mistura *grave-bitume* observa-se um comportamento similar. O vetor verde-contínuo corresponde ao módulo para a temperatura de 10°C e frequência de 10Hz, e o vetor vermelho-contínuo corresponde ao módulo para a temperatura de 20°C e frequência de 10Hz, havendo igualmente um deslocamento da temperatura crítica.

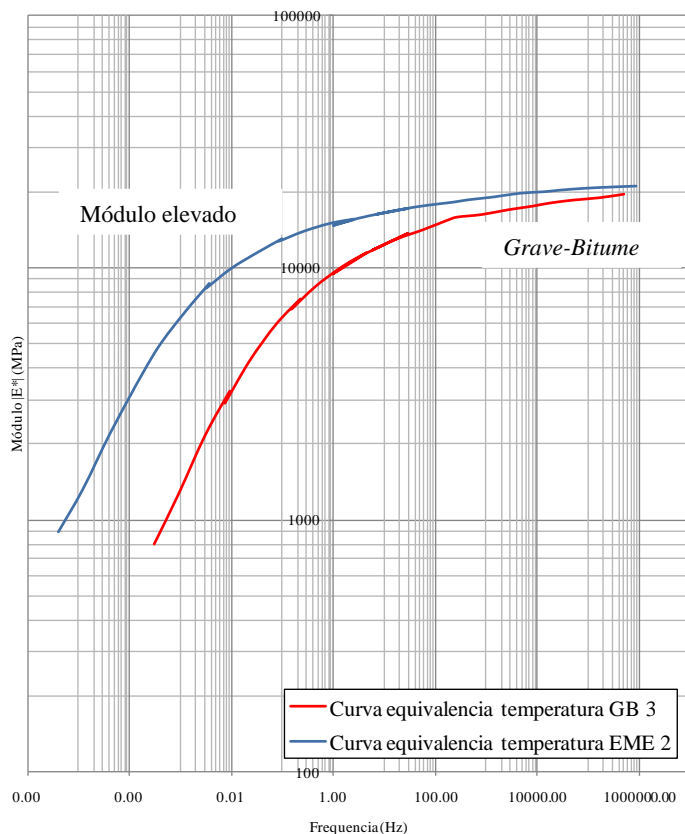
Se comparamos, os dois vetores verdes correspondem as mesmas condições de ensaio temperatura de 10°C e frequência de 10Hz diferenciando-se que o pontilhado corresponde a mistura de módulo elevado com ligante de penetração  $10 \times 10^{-1} \text{ mm}$  e o contínuo a *grave-bitume*  $37 \times 10^{-1} \text{ mm}$ . Há uma tendência, na que a medida que a consistência do ligante diminui o material torna-se mais viscoso.

A susceptibilidade da misturas asfálticas, tanto à frequência como à temperatura, pode ser comparada nas curvas isotermas, no qual pode-se apreciar para uma mesma frequência a mudança significativa dos valores de módulo complexo em função da temperatura (Figura 130).



**Figura 130.** Comparação da susceptibilidade térmica das misturas em representação de curvas isotermas.

No que diz respeito à curva equivalência frequência-temperatura, pode-se observar que para as duas misturas existe uma mudança brusca. Mesmo assim pode-se apreciar que para a mistura de módulo elevado para a temperatura de referência de 15 $^{\circ}\text{C}$ , o módulo complexo é muito superior que para a mistura *grave-bitume* nas baixas frequências, observa-se que a mistura *grave-bitume* é mais susceptível que a mistura de módulo elevado (Figura 131).



**Figura 131.** Comparação da mistura de módulo elevado e mistura *grave-bitume*, para uma temperatura equivalente de 15°C.

A curva é um indicativo da viscoelasticidade dos concretos asfálticos. Numa curva horizontal o material tem um comportamento fortemente elástico e na medida em que esta é mais vertical, o material é mais susceptível termicamente.

## 6.5 ENSAIO DE FADIGA

No ensaio de módulo complexo constatou-se pouca suscetibilidade térmica da mistura de módulo elevado, evidenciado pela pequena variação do ângulo de fase interpretada no modo de representação do espaço Black e outras representações do módulo complexo.

### 6.5.1 Mistura de módulo elevado

Nos ensaios realizados na temperatura de 10°C houve algumas limitações pela elevada rigidez da mistura asfáltica, ocasionando a ruptura das células de carga, havendo a necessidade da instalação de células de cargas de mesma capacidade (500N), porém mais robustas.

Nos ensaios de fadiga realizados na temperatura de 30°C, não houve dificuldade, pois a rigidez dos corpos-de-prova diminuiu devido ao aumento da temperatura.

A deformação correspondente a um milhão de ciclos da curva de fadiga realizada 10°C foi  $240 \pm 19 \mu\text{m}$  muito superior à deformação para um milhão de ciclos determinada no ensaio de fadiga realizado a 30°C o qual foi  $173 \pm 7,9 \mu\text{m}$ .

O elevado valor atribui-se à condição de ensaio na temperatura de 10°C, na qual o material se comporta próximo a um sólido elástico com pouca influência da temperatura. Esta afirmação pode ser constatada na representação do módulo no plano Cole-Cole, revelando que na temperatura dos 10°C o material é solicitado numa condição muito favorável, com módulo elástico elevado e um módulo viscoso baixo, havendo uma perda de energia muito inferior a que teria a uma temperatura mais elevada.

No que diz respeito à inclinação das curvas de fadiga observa-se que estas tem aproximadamente a mesma inclinação sendo -5,4135 para a curva de fadiga realizada a 10°C e -5,1164 para a curva de fadiga a 30°C. A inclinação da curva de fadiga é um indicativo da suscetibilidade da mistura a aplicação das solicitações quanto menor é o valor maior a suscetibilidade da mistura.

Sendo os parâmetros relevantes da curva de fadiga: a deformação para um milhão de solicitação e inclinação da curva de fadiga necessária para definir a lei de fadiga do material.

### 6.5.2 Mistura *grave-bitume*

Os ensaios de fadiga na temperatura de 10°C, foram realizados de maneira satisfatória, esta mistura teve um valor de inclinação da curva de fadiga igual a -6,089 e deformação corresponde para um milhão de ciclos igual a 143,57µm. Em relação à fadiga, esta mistura teve valores muito elevados, considerando que trata-se de uma mistura *grave-bitume* onde os valores de deformação correspondentes para um milhão de solicitações fica próximo dos 90µm.

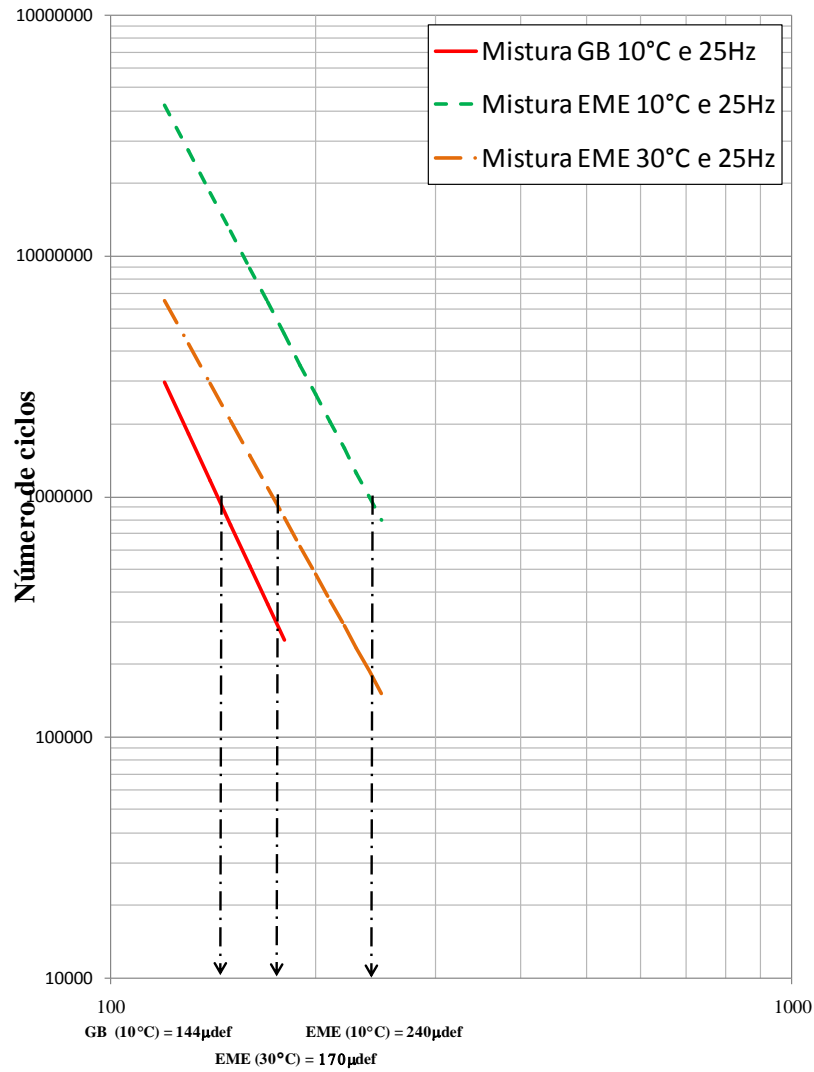
### 6.5.3 Comparação entre as misturas

A deformação correspondente para a mistura de *grave-bitume* foi inferior àquela da mistura de módulo elevado, observando durante a realização dos ensaios uma maior dissipação de energia para esta ultima, com ângulo de fase inicial médio de 5,2°. Já para a mistura de módulo, elevado nas mesmas condições de ensaio, o ângulo de fase médio inicial foi de 2,2°, constatando a maior rigidez desta ultima devido à consistência do ligante. Na realização do ensaio à temperatura de 30°C, o ângulo de fase foi muito maior para a mistura de módulo elevado em média 10,9°. Ainda assim, sua deformação para um milhão de ciclos foi um pouco maior do que para a mistura *grave-bitume*.

Com o propósito de verificar a influência da consistência do ligante como da temperatura. Foram desenhados na mesma escala os resultados correspondentes das três misturas asfálticas para as condições de temperaturas ensaiadas.

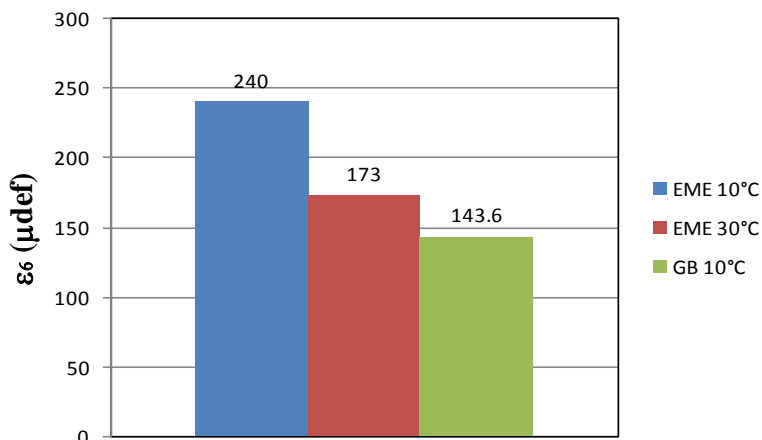
Comparando as curvas de fadiga observa-se que a na temperatura de 30°C a deformação para um milhão de solicitações foi inferior à temperatura de 10°C devido ao aumento da temperatura apresentando na temperatura 30°C um comportamento menos rígido, ainda assim o valor de deformação correspondente para um milhão de ciclos foi alto devido à elevada consistência do ligante asfáltico (Figura 132) e (Figura 133).

Pode-se concluir que a natureza do ligante influencia diretamente, tanto no comportamento viscoelástico do material quanto nos seus parâmetros intrínsecos, sendo necessária a realização de ensaios de laboratório para avaliar seu comportamento e aplicação. Determinando a condição crítica para cada material especificamente.



**Figura 132.** Comparação entre as curvas de fadiga.





**Figura 133.** Deformação correspondente para um milhão de ciclos no ensaio de fadiga à temperatura do ensaio.

## 6.6 MODELO REOLÓGICO DE HUET-SAYEGH

O modelo reológico de comportamento das misturas asfálticas foi calibrado a partir do ensaio de módulo complexo. Foi definido o valor do  $E_\infty$ , por extrapolação das medidas do módulo no espaço Black, sendo os valores para a mistura de módulo elevado igual a  $E_\infty = 21152,0\text{MPa}$  e para a mistura grave-bitume  $E_\infty = 20159,1\text{MPa}$ .

O parâmetro  $E_0$  foi determinado por extrapolação no plano Cole e Cole com valores de  $E_0 = 170,3\text{MPa}$  para as misturas de módulo elevado e  $E_0 = 139,28$  para misturas *grave-bitume*.

A calibração dos coeficientes parabólicos do modelo  $k$ ,  $h$  e parâmetros  $\delta$  e  $\tau$  foram determinados por aproximação o programa Viscoanálise, na tabela são apresentados os parâmetros do modelo de Huet-Sayegh para as misturas ensaiadas (Tabela 50).

**Tabela 50.** Parâmetros do modelo de Huet-Sayegh.

| Parâmetros | Mistura EME | Mistura GB |
|------------|-------------|------------|
| $E_0$      | 170,3       | 139,3      |
| $E_\infty$ | 21152,0     | 20159,1    |
| $k$        | 0,214       | 0,232      |
| $h$        | 0,672       | 0,652      |
| $\delta$   | 1,637       | 1,704      |

Ao substituir os valores dos parâmetros do modelo de Huet-Sayegh na equação 88 permite-se ilustrar o espectro contínuo do modelo.

$$E^*(i\omega\tau(\theta)) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau(\theta))^{-k} + (i\omega\tau(\theta))^{-h}} \quad (88)$$

$$\tau(\theta) = e^{(A_0 + A_1\theta + A_2\theta^2)} \quad (89)$$

Onde:

$E_\infty$  = módulo instantâneo para quando  $\omega\tau$  tende ao  $\infty$ , é obtido para as elevadas frequências e baixas temperaturas;

$E_0$  = módulo estático, obtido para a condição de baixas frequências e elevadas temperaturas;

$k, h$  = expoentes dos elementos parabólicos do modelo;

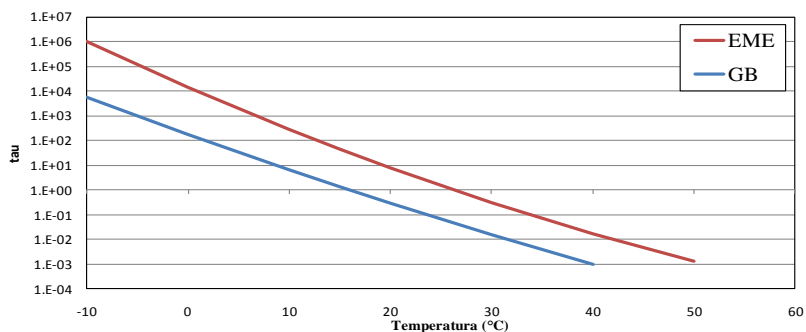
$\delta$  = função da natureza do ligante e composição granulométrica;

$\tau$  = tempo de relaxação dos amortecedores, parâmetro em função do tempo, que varia com a temperatura;

$\omega$  =  $2\pi f$ , pulsação;

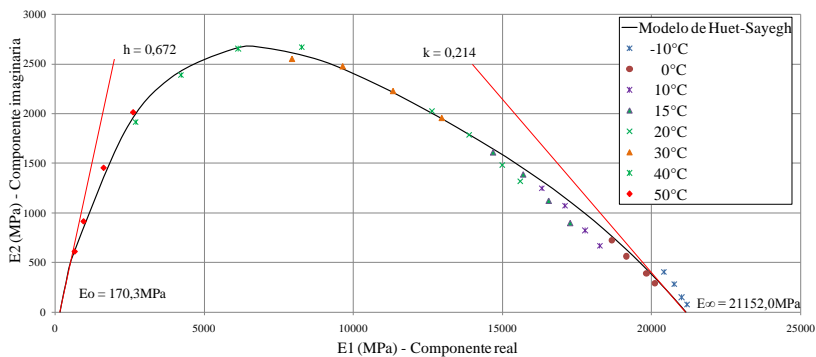
$f$  = frequência de solitação.

Na Figura 134 e ilustrado a variação de “ $\tau$ ” com a temperatura.

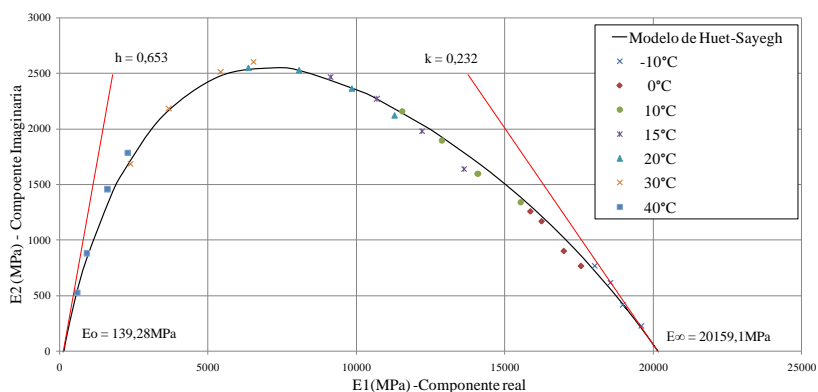


**Figura 134.** Variação de tau com a temperatura.

A Figura 135 e Figura 136 ilustram o modelo de Huet-Sayegh para a mistura de módulo elevado e *grave-bitume* respectivamente.



**Figura 135.** Representação da mistura de módulo elevado no modelo de Huet-Sayegh.



**Figura 136.** Representação da mistura *grave-bitume* no modelo de Huet-Sayegh.

A análise das respostas dos materiais colocados numa estrutura hipotética leva em conta a viscoelasticidade dos concretos asfálticos, através do modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh.

## 6.7 DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento é realizado segundo as diretrizes do manual de dimensionamento Francês *Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes* (SETRA-LCPC, 1997). O dimensionamento é dividido em três etapas principalmente: na modelação, na determinação dos valores admissíveis dos materiais, a partir dos ensaios de fadiga, e no cálculo das deformações devido às cargas externas, considerando a rigidez de cada camada através do módulo complexo.

Comumente as deformações para as diferentes camadas do pavimento, são calculadas considerando-se que estas têm comportamento elástico. Porém, como o comportamento dos concretos asfálticos é viscoelástico dependente da temperatura. Neste trabalho é considerado o comportamento viscoelástico através do módulo complexo. É utilizado o modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh, a velocidade da carga, no cálculo das deformações na fibra inferior das camadas de concreto asfáltico.

O número de eixos equivalentes é determinado em função da media diária anual (ADM). Durante o primeiro ano de operação, foi adotado como media diária anual 1200 veículos pesados correspondente a um tráfego T0 (SETRA, 1997). A taxa de crescimento ( $\tau$ ) igual a 4%, para um período de projeto (p) de 30 anos e considerando que se trata de uma estrutura de pavimento de concreto betuminoso espessa superior a 20cm, o coeficiente de agressividade (CAM) igual a 1. Onde o número de eixos equivalentes correspondente é igual a  $24,6 \times 10^6$ .

$$NE = N \times CAM \quad (90)$$

$$N = 365 \times ADM \times C \quad (91)$$

$$C = ((1 + \tau)^p - 1) / \tau \quad (92)$$

Onde:

NE = Número de eixos equivalentes;

N = Número acumulado de veículos para o período de projeto;

CAM = Coeficiente de agressividade;

C = Acumulação do fator para o período de cálculo;

p = Número de anos;

$\tau$  = taxa de crescimento anual.

As deformações admissíveis dos materiais é função do número de eixos equivalentes. A deformação admissível do topo subleito é  $274\mu\text{def}$ , calculada pela (equação 93).

$$\varepsilon_{z, \text{adm}} = 0,012(\text{NE})^{-0,222} \quad (93)$$

Onde:

$\varepsilon_{z, \text{adm}}$  = Deformação admissível do topo do subleito.

O cálculo da deformação admissível dos materiais betuminosos leva em conta, além do número de eixos equivalentes, valores característicos das misturas asfálticas determinado no ensaio de módulo complexo e resistência à fadiga.

A deformação admissível é corrigida pelos coeficientes de risco calage e heterogeneidade. (Tabela 51)

**Tabela 51.** Coeficientes de risco adotados.

| Curva de fadiga | kr  | kc  | ks  |
|-----------------|-----|-----|-----|
| GB 10°C e 25Hz  | 0,9 | 1,3 | 1,0 |
| EME 10°C e 25Hz | 0,8 | 1,0 | 1,0 |
| EME 30°C e 25Hz | 0,9 | 1,0 | 1,0 |

\* O coeficiente de risco kr calculado para um risco de 10%.

O dimensionamento é realizado para a temperatura equivalente de 15°C e frequência representativa de 10Hz. A mistura de módulo elevado resultou em valores muito elevados de deformação correspondente para um milhão de solicitações no ensaio de fadiga realizado a 10°C e 25Hz devido a natureza do material. Com o propósito de avaliar o comportamento deste material colocado no dimensionamento a temperaturas mais elevadas. A partir da curva de fadiga realizada a 30°C, determinou-se a deformação admissível para esta condição, considerando como temperatura de referência para a modelação a temperatura de 30°C e 10Hz (Tabela 52) e (Tabela 53).

**Tabela 52.** Deformações admissíveis dos materiais betuminosos temperatura de referência 15°C.

| Material | $\varepsilon_6, \mu\text{def}$<br>(10°C e 25Hz) | SN   | $[E^*], (\text{MPa})$<br>(15°C e 10Hz) | $[E^*], (\text{MPa})$<br>(10°C e 10Hz) | b     | $\varepsilon_{\text{adm}} \mu\text{def}$ |
|----------|---|------|--|--|-------|--|
| GB       | 143,6   | 0,17 | 12365                                  | 14178                                  | -0,16 | 107,7                                    |
| EME      | 240,0   | 0,33 | 16595                                  | 17796                                  | -0,18 | 112,9                                    |

Para a mistura de módulo elevado foi determinada a deformação admissível para o ensaio de fadiga realizado na temperatura de 30°C.

**Tabela 53.** Deformação admissível calculada a partir da curva de fadiga a 30°C.

| Material | $\epsilon_6, \mu\text{def}$<br>(30°C e 25Hz) | SN   | $ E^* , \text{(MPa)}$<br>(30°C e 10Hz) | b     | $\epsilon_{adm} \mu\text{def}$ |
|----------|--|------|--|-------|--------------------------------|
| EME 30°C | 173,0  | 0,17 | 11554                                  | -0,20 | 82,5                           |

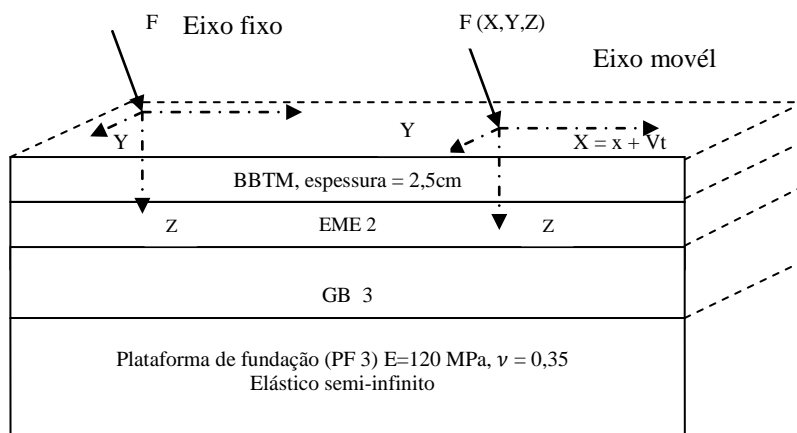
A estrutura do pavimento projetada é composta de plataforma de fundação (subleito) considerado com comportamento elástico, camada de sub-base (foundation) de material betuminoso com comportamento viscoelástico e camada de base com material betuminoso com comportamento viscoelástico.

Misturas betuminosas espessas podem ser assentadas diretamente sobre o arado de terraplanagem o ou sobre uma plataforma de fundação (plata-forme) para situações de tráfego elevado T0 a plataforma de suporte deve ter como mínimo um modulo acima de 120MPa. Cabe ressaltar que o arado de terraplanagem constitui trabalhos de terraplanagem e adequação do terreno no primeiro metro de profundidade.

As misturas de módulo elevado e *grave-bitume* correspondem a misturas densas com pouca macrotextura de modo que faz-se necessário utilizar uma camada delgada tipo BBTM para garantir aderência entre o pneu e o pavimento.

Com o propósito de verificar a influência da temperatura na espessura das camadas de base e sub-base, três situações de estrutura do pavimento foram analisadas. No calculo das deformações das camadas do pavimento e desconsiderada a rigidez da camada de rolamento BBTM por dois fatores principalmente, primeiramente evidenciar a variação da espessura das camadas estruturais devido à temperatura considerando a rigidez das misturas nas temperaturas respectiva, sem incorrer em suposições no que respeita a rigidez do material de rolamento as temperaturas de 15°C e 30°C e por ser uma camada com características funcionais onde as espessuras são mínimas. Sendo a situação modelada corresponde a mais critica.

- Combinação das duas misturas;
- Camada de *grave-bitume* como cada de base e sub-base;
- Camada de módulo elevado como camada de base e sub-base.



**Figura 137.** Estrutura do pavimento tipo analisado.

A modelação foi realizada com o programa ViscoRoute, considerando o modelo de Huet-Sayegh. O módulo das misturas asfálticas considerado na modelação, utiliza as variáveis calculadas para o modelo reológico de Huet-Sayegh (Tabela 50) para todos os casos o coeficiente de Poisson foi 0,35.

No cálculo das deformações das camadas do pavimento considera-se um eixo duplo com pressão de 0,662MPa por roda, e área de contacto 0,125m com uma distância entre eixos de 0,375. É considerada a velocidade da carga igual a 72km/hr equivalente a 10Hz.

O dimensionamento é verificado considerando duas situações de temperatura 15°C e 30°C. Esta segunda com o propósito de evidenciar o efeito da temperatura na espessura da estrutura do pavimento, considerando que para a mistura de módulo elevado a temperatura crítica esteve próximo aos 30°C, temperaturas às que pode chegar o pavimento em regiões quentes. Cabe ressaltar que para ser aplicado o dimensionamento de uma maneira mais realista, deve-se conhecer a temperatura equivalente para a região de aplicação.

Foram respeitadas as espessuras mínimas estabelecidas para as misturas de módulo elevado e *grave-bitume* estabelecidas nas normas NF 98-140 e NF P 98-138. As espessuras adotadas são as correspondentes para que a deformação de distensão calculada na fibra inferior da camada betuminosa de maior profundidade seja inferior à deformação admissível e a sua vez a deformação vertical no topo da plataforma de fundação seja inferior à deformação admissível ( $\epsilon_{z, adm}$ ).

Na Tabela 54 são apresentados os resultados das deformações na fibra inferior da camada de concreto asfáltico e no topo da plataforma de fundação e as respectivas espessuras.

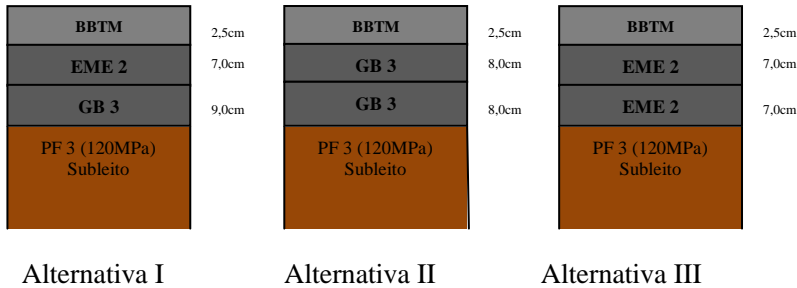
**Tabela 54.** Dimensionamento para um a temperatura de referência 15°C e 10Hz.

| ALTERNATIVA<br>(1) | $\epsilon_{cal}$ | e<br>(cm) | ALTERNATIVA<br>(2) | $\epsilon_{cal}$ | e<br>(cm) | ALTERNATIVA<br>(3) | $\epsilon_{cal}$ | e<br>(cm) |
|--------------------|------------------|-----------|--------------------|------------------|-----------|--------------------|------------------|-----------|
| BBTM               |                  | 2,5       | BBTM               |                  | 2,5       | BBTM               |                  | 2,5       |
| EME                |                  | 7,0       | GB                 |                  | 8,0       | EME                |                  | 7,0       |
| GB                 | 99,9             | 9,0       | GB                 | 102,9            | 8,0       | EME                | 101,3            | 7,0       |
| PF 3 (120MPa)      | 84,4             |           | PF 3 (120MPa)      | 85,9             |           | PF 3 (120MPa)      | 81,26            |           |
| TOTAL              |                  | 18,5      | TOTAL              |                  | 18,5      | TOTAL              |                  | 16,5      |

\*e = espessura da camada

\* $\epsilon_{cal}$  = deformação calculada na fibra inferior da camada betuminosa ou no topo da plataforma de fundação.

Nas Figura 138 e Figura 139 são ilustrados os perfis das estruturas projetadas.



**Figura 138.** Estruturas do pavimento para a temperatura de 15°C e 10Hz.

Para constatar o efeito da temperatura no dimensionamento, realizou-se outra estimativa das espessuras das camadas de concreto asfáltico, considerando para a mistura de módulo elevado o valor de deformação admissível correspondente a temperatura de 30°C (Tabela 55).

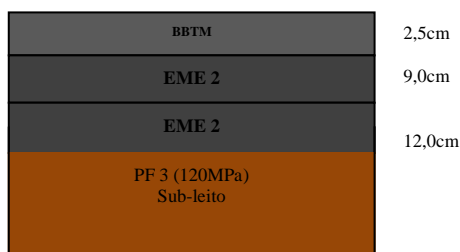


**Tabela 55.** Dimensionamento para estrutura com mistura de módulo elevado a temperatura 30°C e 10Hz.

| ALTERNATIVA<br>(3) | $\epsilon_{cal}$ | e (cm) |
|--------------------|------------------|--------|
| BBTM               |                  | 2,5    |
| EME                |                  | 9,0    |
| EME                | 79,3             | 12,0   |
| PF 3 (120MPa)      | 71,43            |        |
| TOTAL              |                  | 23,5   |

\*e = espessura da camada

\* $\epsilon_{cal}$  = deformação calculada na fibra inferior da camada betuminosa ou no topo da plataforma de fundação.

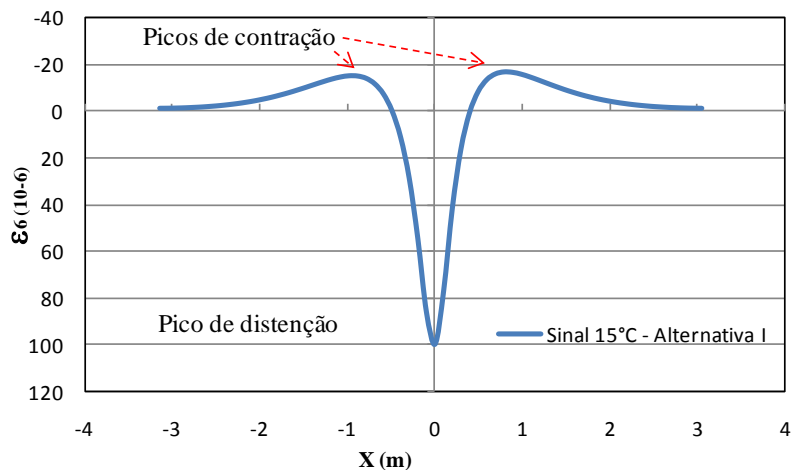


**Figura 139.** Estruturas do pavimento para a temperatura de 30°C e 10Hz.

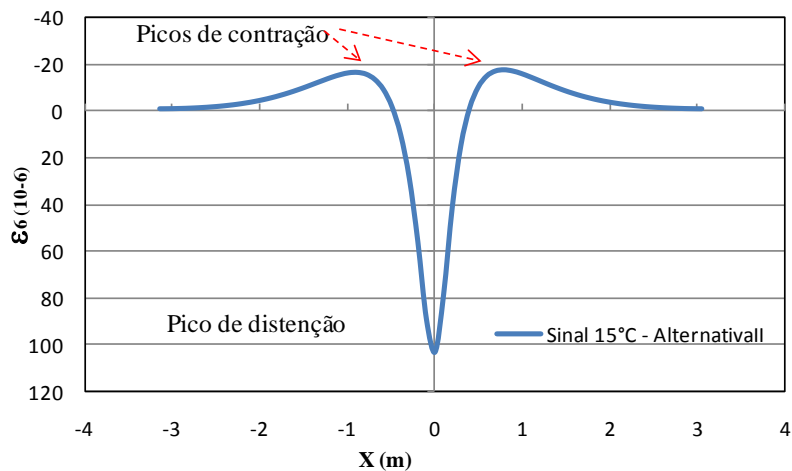
Para as três primeiras situações de dimensionamento, no qual foi considerado a deformação admissível das misturas determinadas à temperatura de 10°C e 25Hz e temperatura equivalente de 15°C, não se encontrou variação significativa nas espessuras das camadas.

No ensaio de fadiga a 30°C e 25Hz, a deformação correspondente para 1 milhão de ciclos mudou de 240  $\mu$ def a 10°C e 25Hz para 173  $\mu$ def a 10°C e 25Hz, e conseqüentemente as deformações admissíveis respectivas foram 112,9  $\mu$ def e 82,5  $\mu$ def. Este fato evidencia para a mistura de módulo elevado para a condição de temperatura de 30°C, Ainda assim continua sendo um material de características mecânicas elevadas pouco suscetível à variação de temperatura.

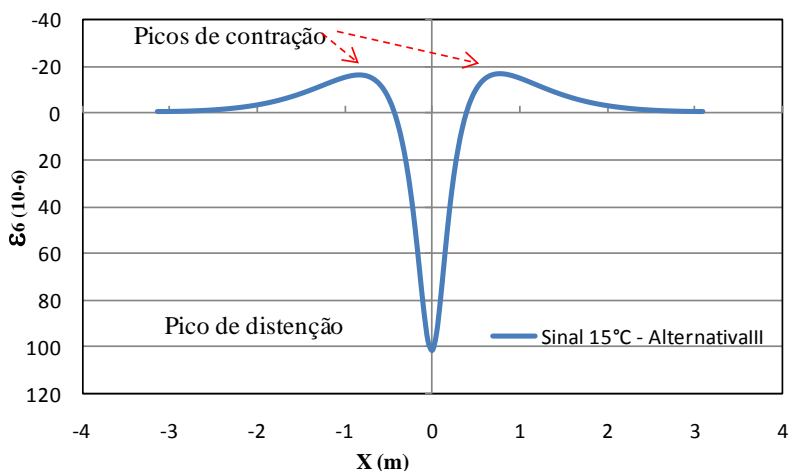
Com o propósito de visualizar tanto a inversão de sinal de deformação quanto o efeito da temperatura para duas situações de dimensionamento que envolve a combinação dos dois materiais utilizados nesta pesquisa, para as temperaturas de 15°C e 30°C, são desenhados os respectivos sinais de deformação na base das camadas betuminosas de maior profundidade para cada alternativa (Figura 140) a (Figura 143).



**Figura 140.** Sinal de deformação alternativa I, temperatura equivalente de 15°C e velocidade de 72km/hr.

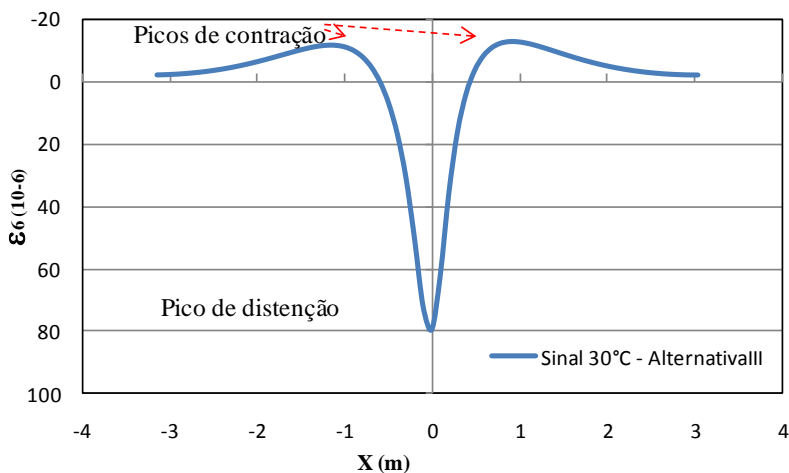


**Figura 141.** Sinal de deformação alternativa II, temperatura equivalente de 15°C e velocidade de 72km/hr.



**Figura 142.** Sinal de deformação alternativa III, temperatura equivalente de 15°C e velocidade de 72km/hr.

De igual forma para a temperatura de 30°C é apresentado os sinais de deformação na base da camada de maior profundidade.



**Figura 143.** Sinal de deformação alternativa III, temperatura de 30°C e velocidade de 72km/hr.

Nos sinais de deformação modelados consta-se a alternância do sinal de deformação de contração-distensão-contração, a forma do sinal muito similar aos sinais medidos em campo através de extensômetros por PERRET, (2003).

## 7 CONCLUSÕES

Os procedimentos e métodos utilizados permitiram atender os objetivos propostos no que diz respeito à formulação e verificação do comportamento mecânico de misturas asfálticas com ligantes de elevada consistência. Dentro das considerações mais importantes podem-se enumerar as principais:

A susceptibilidade térmica e características do ligante afeta de maneira significativa o comportamento mecânico das misturas betuminosas. Ligantes com maior consistência apresentam desempenhos muito superiores, com tendência a um comportamento elástico nas baixas temperaturas, existindo um limite a partir do qual o material torna-se mais viscoelásticos. Este valor para a mistura de módulo elevado esteve em torno dos 30°C e para a mistura *grave-bitume* em torno dos 20°C.

O teor de ligante tem efeito significativo na densificação das misturas betuminosas. Para condições constantes de granulometria tamanho máximo e percentagem de finos, a compacidade evolui de maneira linear. Porém, existe um limite no qual, devido ao excesso de ligante, constou-se variação da compacidade pela mudança de inclinação da curva de compactação. Esta tendência foi evidenciada na mistura de módulo elevado pelos elevados teores de ligantes utilizados no processo de formulação. O ensaio de compactação por cisalhamento giratório permitiu avaliar de maneira satisfatória a consistência das fórmulas ensaiadas enquadrando-se dentro dos requerimentos normativos para cada tipo de mistura.

A consistência do ligante aumenta as características mecânicas em relação à sensibilidade à água Duriez. Esta aumenta a tensão de ruptura à compressão simples seco, dobrando seu valor. Para a mistura *grave-bitume* esteve entre 9,48MPa e 12,67MPa e para a mistura de módulo elevado esteve entre 21,74MPa e 24,98MPa. Este fato não melhora a sensibilidade à água, já que a variação de  $r/R$  não foi significativas entre as duas misturas. Estando mais atribuída à quantidade de ligante asfáltico, observou-se que com aumento do teor de ligantes as misturas asfálticas são menos sensíveis à umidade devido a uma maior densificação do material que, conseqüentemente, resulta em percentagem de vazios menores.

Todas as misturas de módulo elevado avaliadas atenderam ao critério de formulação inferior a 7,5% no ensaio de deformação permanente e inferior a 10% para as misturas *grave-bitume* nos 30000 ciclos e 10000 ciclos respectivamente. A consistência do ligante diminui o potencial de afundamento por deformação permanente. Para a mistura de módulo elevado com teor de ligante de 5,7% o afundamento por deformação permanente esteve em 5,2%, muito similar ao valor obtido para a mistura *grave-bitume* com teor de ligante de 4,9%, que resultou em valores de 5,1%. Apesar da mistura de módulo elevado ter um teor de ligante muito mais elevado, esta similitude poderia estar relacionada com a consistência do ligante.

A consistência do ligante permitiu manter-se em valores baixos de deformação permanente. Esta diferença foi mais notadamente para os menores teores de ligantes avaliados para ambas as misturas. Para a mistura *grave-bitume* com teor de ligante de 4,3% o afundamento por deformação permanente foi 4,1% e para a mistura de módulo elevado com teor de ligante de 5,1% o afundamento por deformação permanente foi de 2,8%. Evidencia-se o aumento do desempenho mecânico em relação à deformação permanente para a mistura com ligante de consistência maior.

As duas misturas atenderam valores de módulo na condição de 15°C e 10Hz, com valores superiores a 14000MPa para a mistura de modulo elevado e superiores a 9000MPa para a mistura *grave bitume*. A mistura de módulo elevado apresentou um comportamento com fortemente elástico nas baixas temperaturas, com uma translação da temperatura considerada crítica de 10°C para 30°C evidenciado nos ensaios de módulo complexo. Fato que pode ser atribuído a elevada consistência do ligante onde a suscetibilidade térmica da mistura da mistura foi muito menor para a mistura de módulo elevado que para a mistura *grave-bitume* sendo perceptível na representação gráfica do modulo complexo.

A energia perdida é muito menor que a energia recuperável, que é evidenciado pela pouca variação da componente viscosa e ângulo de fase visualizada tanto no plano Cole-Cole como na representação no espaço Black, com uma menor influência da frequência a baixas temperaturas para a mistura de módulo elevado.

A redução da deformação pelo efeito da temperatura para a mistura de módulo elevado foi constatado no ensaio de fadiga, realizado a 30°C, no qual a deformação do material diminui em relação ao ensaio de fadiga realizado a 10°C, fato importante na determinação das propriedades intrínsecas da mistura. Outro fator importante foi o aumento do ângulo de fase dos ensaios realizados de 10°C para 30°C. Em relação à resistência em fadiga das misturas betuminosas estiveram acima dos valores exigidos para cada tipo de mistura para milhão de solicitações, sendo sempre maior os valores da mistura de módulo elevado em relação a mistura *grave-bitume*, indistintamente da temperatura do ensaio.

O modelo reológico de comportamento de Huet-Sayegh permitiu considerar as variáveis viscoelásticas e o efeito da temperatura na modelação das respostas do pavimento para a serem aplicadas ao dimensionamento. Os valores dos parâmetros do modelo foram muito similares a diferença de  $t$  que é rígido pela temperatura visualizando neste modelo a mesma transição acontecida no plano Cole-Cole para os dados experimentais. Permitindo representar o comportamento reológico das misturas asfálticas ensaiadas.

As espessuras calculadas no dimensionamento permitiram verificar a influência da temperatura. A partir das observações do ensaio de módulo e fadiga os materiais tem que ser avaliados nas condições crítica para serem aplicados de forma correta, já que poderia incorrer que os valores calculados sejam comparados com condições muito favoráveis sendo numa situação irreal ao comportamento do material. A temperatura para a qual os concretos asfálticos com ligantes de elevada consistência deve ser estudada para cada local e modelada conforme as condições de aplicação, assim como os respectivos parâmetros admissíveis para o melhor desempenho do pavimento.

Algumas recomendações podem ser realizadas referentes ao estudo de misturas de módulo elevado:

Estudar o comportamento das misturas de módulo elevado para cada situação e nível de temperatura de acordo com a temperatura equivalente do local de projeto, para serem aproveitados da melhor maneira possível no dimensionamento do pavimento.

Verificar o comportamento destes materiais em ensaios acelerados de campo, avaliando o comportamento e as espessuras das camadas no que respeita a fissuração por fadiga do material.

Estudar outras granulometrias e tipos de materiais de módulo elevado como soluções para rodovias de tráfego pesado e intenso.



## REFERÊNCIAS

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-140**. Enrobés hydrocarbonés: Couches de assises, Enrobés à module élevé, 1992.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-138**. Enrobés hydrocarbonés: Couches de assises, graves bitume, 1992.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-250-2**. Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés. Partie 2: Compactage des plaques, 1991.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-253-1**. Essais relatifs aux chaussées: Déformation permanente des mélanges hydrocarbonés. Partie 1: Essai d'Orniérage, 1991.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-250-3**. Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés. Parte 3: Confection d'éprouvettes dans un bloc de melange hydrocarboné, 1993.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-261-1**, Essais relatifs aux chaussées: Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés. Partie 1: Essai par flexion à flèche constante, 1993.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-260-2**. Essais relatifs aux chaussées: Mesure des caractéristiques rhéologiques des mélanges hydrocarbonés. Partie 2: Détermination du module complexe par flexion sinusoïdale, 1992.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF EN 12697-5**. Mélanges bitumineux: Méthodes d'essai por mélange hydrocarboné à chaud. Partie 5: Masse volumique maximale (masse volumique réelle) des matériaux bitumineux, 2003.

ASSOCIATION, FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 18-559**. Mode opératoire de la mesure de masse volumique de granulats, 2005.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-251-1**. Essais relatifs aux chaussées: Préparation des mélanges hydrocarbonés: Essai de Duriez, 2002.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION. **AFNOR NF P 98-252**. Essais relatifs aux chaussées: Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG), 1999.

BAAJ, Hassan. **Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés**, Thèse de Docteur. Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

BARRA, Breno Salgado. **Avaliação da Ação da Água no Módulo Complexo e na Fadiga de Misturas Asfálticas Densas**. Tese Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis (2009).

BROSSEAUD, Yves. **Les Enrobés à Module Eleve: Bilan de L'expérience de Française et Transfert de Technologie**". 7<sup>o</sup> Congrès National de la Route, 2006.

CASTAÑEDA, E. **Contribution de Methodes Non Destructives a l'Evaluation de l'Effet de l'Eau sur les Enrobés Bitumineux**. Thèse de Doctorat. Université de Nantes, 2004.

CHABOT A; CHUPIN O; DELOFFRE L; DUHAMEL D. **Viscoroute 2.0: a tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement**: Special Issue on Recent Advances in Numerical Simulation of Pavements, 2010.

CHABOT, P. TAMAGNY, D. POCHÉ, DUHAMEL D. **Visco-elastic modelling for asphalt pavements – Software ViscoRoute**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Division Matériaux et Structures de Chaussées, Nantes, France, 2006.

CORTE, Jean François; BROSSEAUD, Yves; SIMONCELLI, Jean Pierre; CAROFF, Gilbert. **Investigation of rutting of asphalt surface layers**: Influence of binder and of configuration of axle loading. Transportation Research Board, 1994.

De La ROCHE, C. **Module de Rigidité et Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux**. Thèse de Docteur. École Central de Pari, 1996.

De La ROCHE, C; RIVIÈRE, N. **Fatigue Behavior of Asphalt Mixes: Influence of Laboratory test Procedures on Fatigue Performances**. 8th International conference on asphalt pavement, 1997.

DIAKHATE, M. **Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée**. Thèse de Docteur. Université de Limoges, 2007.

DONGMO-ENGELAND, B-J. **Caracterisation des Deformations d'Orniérage des Chaussées, Bitumineuses**. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National des Sciences Apliquees de Lyon. Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État, 2005.

DOMEC, V. **Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux em condition de trafic simulé et de température**. Thèse de Docteur. Université de Bordeaux I, 2005.

DUHAMEL, D; CHABOT, A ; TAMAGNY, P; HARFOUCHE, L. **Viscoroute : Modélisation des chaussées bitumineuses Bulletin de liaison des Ponts et chaussées**, École nationale des Ponts et Chaussées. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Bulletin 258-259, pp89-103, 2005.

EL ABD, Absamad. **Développement d'une méthode de prédiction des déformations de surface des chaussées à assises non traitées**. Thèse de Docteur. Université de Bordeaux I, 2006.

FREITAS, H. B. **Misturas Asfálticas de Módulo Elevado com Uso de Escória de Aciaria como Agregado**. Dissertação de Mestrado, Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

FERREIRA, P.N. **Estudo da Utilização de Revestimentos Asfálticos Delgados a Quente para Pavimento tipo BBTM no Brasil**. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

GOACOLOU, H., MAZÉ, M. **Enrobés à haut module élastique Relation entre les propriétés rhéologiques du bitume et celles de l'enrobé**, Eurobitum, 2000.

HUET, C. **Étude par une méthode d'impédance du comportement viscoélastique des matériaux hydrocarbonés**. Thèse de Docteur. Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 1963.

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTES ET CHAUSSEES. LCPC. **Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés**. Groupe de Travail RST - Formulation des enrobés, France, 2007.

MAGALHÃES, S. T. **Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado: Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

MAILLARD, S. **Fissuration et Autoréparation des liants bitumineux - Apport de l'essai de rupture locale répétée sur bitume**. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2005.

MOMM, Leto. **Estudo dos Efeitos da Granulometria Sobre a Macrotextura Superficial do Concreto Asfáltico e Seu Comportamento Mecânico**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 1998.

MOUTIER, Francis. **Giratory Compactor - Justification of its use in the French mix design**. LCPC, France, 1997.

NGUYEN, V.H. **Comportement dynamique de structures non-linéaires soumises à des charges mobiles**. PhD thesis, ENPC, France, 2002.

NGUYEN, Hoai Nam. **Étude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume**. Thèse de Docteur Ingénieur. spécialité Structures et Matériaux pour Génie Civil, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2008.

OLARD, François. **Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé**. Thèse de Docteur Ingénieur. Institut National des

Sciences Appliquées de Lyon. Laboratoire GéoMatériaux du Département Génie Civil et Bâtiment de Ecole Nationale des Travaux Publics de l'État, 2003.

PERRET, J. **Déformation des Couches Bitumineuses au Passage d'Une Charge de Trafic**. Thèse de Doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Lausanne, France, 2003.

PERRET, J; OULD-HENIA, O; DUMONT, A. **High modulus pavement design using accelerated loading testing (alt)**. Laboratory of Traffic Facilities (LAVOC), Swiss Federal Institute of Technology Lausanne (EPFL). 3rd Euraspalt & Eurobitume Congress Vienna, 2004.

RIVIÈRE, N. **Comportement en Fatigue des Enrobés Bitumineux**, Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 1996.

ROHDE, Luciana, **Estudo de misturas asfálticas de módulo elevado para camadas estruturais de pavimentos**, Tese de doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007.

SETRA-LCPC. **French Design Manual for Pavement Structures - Guide Technique**. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA); Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 1997.

SETRA-LCPC. **Conception et dimensionnement des structures de chaussée, guide-technique**, paris, décembre. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes (SETRA); Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), 1994.

SETRA. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes. **Les enrobés à module élevé**. Note d'information, Bagneux, n.96, 1997.

THIVES, L. **Optimização do Desempenho de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha para Reabilitação de Pavimentos**. Universidade do Minho/Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.